

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Návrh kvalifikace postupu pro ověření procesu tepelného dělení  
Proposal on Procedure for Checking Capability of Thermal Cutting  
Process

Student:

Bc. Antonín Žídek

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Martin Sondel, Ph.D.

Ostrava 2016

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra mechanické technologie

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Antonín Žídek**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie  
Specializace: 20 Strojírenská technologie  
Téma: **Návrh kvalifikace postupu pro ověření procesu tepelného dělení**  
**Proposal on Procedure for Checking Capability of Thermal Cutting Process**  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte teoretický rozbor procesu tepelného dělení konstrukčních ocelí
2. Popište požadavky současné evropské legislativy na kvalifikaci procesu tepelného dělení
3. Navrhněte vhodný způsob kvalifikace a ověření vybraného procesu tepelného dělení
4. Na vybraném základním materiálu proveďte ověření procesu tepelného dělení
5. Vyhodnoťte získané výsledky

Seznam doporučené odborné literatury:

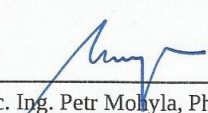
KOUKAL, Jaroslav; SCHWARZ, Drahomír; HAJDÍK Jiří. *Materiály a jejich svařitelnost*. Vyd. 1. Ostrava: Český svářečský ústav s.r.o., VŠB-Technická Univerzita, 2009. 241 s. ISBN 978-80-248-2025-5.  
KOUKAL, Jaroslav; ZMYDLENÝ, Tomáš. *Svařování I*. Vyd. 1. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2005. 136 s. ISBN 80-248-0870-6.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Sondel, Ph.D.**

Datum zadání: 11.12.2015  
Datum odevzdání: 16.05.2016




  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Petr Mohyla, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

12.5. 2016



V Ostravě .....

.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že

jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užitá díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo. □

beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3). □

souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO. □

bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona. □

bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše). □

beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

12.5. 2016



V Ostravě :.....

.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Antonín Židek

Adresa trvalého pobytu autora práce: Karla Štěcha 18, České Budějovice



## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

ŽÍDEK, Antonín. *Návrh kvalifikace postupu pro ověření procesu tepelného dělení*. Ostrava, 2016. Diplomová práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie. Vedoucí práce Ing. Martin Sondel, Ph.D.

Diplomová práce je rozdělena do dvou hlavních částí. Teoretická a praktická část. V teoretické je obsažen předmět normy ČSN EN ISO 9013, popis dělení materiálu kyslíkem a popis dělení materiálu plazmou. V praktické části je popsán samotný postup zhotovování zkušebních vzorků, jeho zkoušení a následné výpočty. Jednotlivé zkoušky a měření jsou měření rychlosti řezání, vizuální kontrola, měření drsnosti, měření tvrdosti a makrostruktura.

## ANNOTATION THESIS

ŽÍDEK, Antonín. *Proposal on Procedure for Checking Capability of Thermal Cutting Process*. Ostrava, 2016. Dissertation. VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Technology. Supervisor Ing. Martin Sondel, Ph.D.

The thesis is divided into two main parts. Theoretical and practical part. The theory is included subject to CSN EN ISO 9013, a description of material cutting oxygen and a description of material cutting plasma. The practical part describes the procedure making samples of its testing and calculations. Individual tests and measurements are measurements of the cutting speed, visual inspection, measurement of roughness, hardness measurement and macrostructure.

## Obsah

Seznam tabulek:	7
Seznam obrázků:	9
Seznam grafů:	11
Seznam použitých značek a symbolů	12
Úvod	15
1. Teoretická část	16
1.1 Předmět normy ČSN EN ISO 9013	16
1.2.1 Teoretické základy dělení materiálu kyslíkem	16
1.2.2 Řezání kovu kyslíkem	18
1.2.3 Řezání kovů kyslíkem pomocí prášků	22
1.3.1 Řezání plazmou	23
1.3.2 Vznik plazmy	24
1.3.3 Princip dělení materiálu plazmou	26
1.3.4 Zařízení pro dělení materiálu plazmou	28
1.3.5 Kvalita povrchu řezu	31
1.3.6 Vlastnosti plazmového řezání	32
2. Praktická část	33
Metodika řešení praktické části	35
2.1 Měření rychlosti řezání	35
2.2 Vizualní kontrola	40
2.3 Měření drsnosti	46
2.4 Měření tvrdosti	50
2.5 Makrostruktura	57
Závěr	79
Poděkování	80
Použitá literatura	80
Internetové zdroje	80
Seznam příloh	81

## Seznam tabulek:

Tabulka 1.1: Vlastnosti topných plynů.....	17
Tabulka 1.2: Ionizační potenciál plynů.....	25
Tabulka 2.1: Délka dráhy jednotlivých oblastí.....	35
Tabulka 2.2: Plazmou řezané vzorky o jakosti S355.....	36
Tabulka 2.3: Plazmou řezané vzorky o jakosti S235.....	37
Tabulka 2.4: Kyslíkem řezané vzorky o jakosti S355.....	38
Tabulka 2.5: Kyslíkem řezané vzorky o jakosti S235.....	39
Tabulka 2.6: Vizuální kontrola vzorku o jakosti S355 řezaného plazmou.....	44
Tabulka 2.7: Vizuální kontrola vzorku o jakosti S235 řezaného plazmou.....	45
Tabulka 2.8: Vizuální kontrola vzorku o jakosti S355 řezaného kyslíkem.....	45
Tabulka 2.9: Vizuální kontrola vzorku o jakosti S235 řezaného kyslíkem.....	45
Tabulka 2.10: Naměřené hodnoty.....	46
Tabulka 2.11: Označení vzorků.....	50
Tabulka 2.12: Počet a oblast měření tvrdosti.....	51
Tabulka 2.13: Dovolené maximální hodnoty tvrdosti (HV 10).....	52
Tabulka 2.14: Výsledné hodnoty tvrdostí vzorek PL20.....	52
Tabulka 2.15: Výsledné hodnoty tvrdostí vzorek PL15.....	53
Tabulka 2.16: Výsledné hodnoty tvrdostí vzorek PL10.....	54
Tabulka 2.17: Výsledné hodnoty tvrdostí vzorek PL4.....	54
Tabulka 2.18: Výsledné hodnoty tvrdostí vzorek OXY20.....	55
Tabulka 2.19: Výsledné hodnoty tvrdostí vzorek OXY15.....	55
Tabulka 2.20: Výsledné hodnoty tvrdostí vzorek OXY10.....	56
Tabulka 2.21: Výsledné hodnoty tvrdostí vzorek OXY4.....	56
Tabulka 2.22: Pozitivní výsledky zkoušky tvrdostí.....	57
Tabulka 2.23: Velikost, $\Delta a$ .....	59
Tabulka 2.24: Úchylka kolmosti nebo úhlová úchylka, $u$ .....	60
Tabulka 2.25: Průměrná výška prvků profilu, Rz5.....	60
Tabulka 2.26: Toleranční pole úchylky kolmosti pro vzorek PL4 strana A.....	62
Tabulka 2.27: Toleranční pole průměrné výšky prvků profilu pro vzorek PL4 strana A...	62
Tabulka 2.28: Toleranční pole úchylky kolmosti pro vzorek PL4 strana B.....	63

Tabulka 2.29: Toleranční pole průměrné výšky prvků profilu pro vzorek PL4 strana B.....	63
Tabulka 2.30: Toleranční pole úchylky kolmosti pro vzorek PL10 strana A.....	64
Tabulka 2.31: Toleranční pole průměrné výšky prvků profilu pro vzorek PL10 strana A.....	64
Tabulka 2.32: Toleranční pole úchylky kolmosti pro vzorek PL10 strana B.....	65
Tabulka 2.33: Toleranční pole průměrné výšky prvků profilu pro vzorek PL10 strana B.....	65
Tabulka 2.34: Toleranční pole úchylky kolmosti pro vzorek PL15 strana A.....	66
Tabulka 2.35: Toleranční pole průměrné výšky prvků profilu pro vzorek PL15 strana A.....	66
Tabulka 2.36: Toleranční pole úchylky kolmosti pro vzorek PL15 strana B.....	67
Tabulka 2.37: Toleranční pole průměrné výšky prvků profilu pro vzorek PL15 strana B.....	67
Tabulka 2.38: Toleranční pole úchylky kolmosti pro vzorek PL20 strana A. ....	68
Tabulka 2.39: Toleranční pole průměrné výšky prvků profilu pro vzorek PL20 strana A.....	68
Tabulka 2.40: Toleranční pole úchylky kolmosti pro vzorek PL20 strana B.....	69
Tabulka 2.41: Toleranční pole průměrné výšky prvků profilu pro vzorek PL20 strana B.....	69
Tabulka 2.42: Toleranční pole úchylky kolmosti pro vzorek OXY4 strana A.....	70
Tabulka 2.43: Toleranční pole průměrné výšky prvků profilu pro vzorek OXY4 strana A.....	70
Tabulka 2.44: Toleranční pole úchylky kolmosti pro vzorek OXY4 strana B.....	71
Tabulka 2.45: Toleranční pole průměrné výšky prvků profilu pro vzorek OXY4 strana B.....	71
Tabulka 2.46: Toleranční pole úchylky kolmosti pro vzorek OXY10 strana A.....	72
Tabulka 2.47: Toleranční pole průměrné výšky prvků profilu pro vzorek OXY10 strana A.....	72
Tabulka 2.48: Toleranční pole úchylky kolmosti pro vzorek OXY10 strana B.....	73
Tabulka 2.49: Toleranční pole průměrné výšky prvků profilu pro vzorek OXY10 strana B.....	73
Tabulka 2.50: Toleranční pole úchylky kolmosti pro vzorek OXY15 strana A. ....	74
Tabulka 2.51: Toleranční pole průměrné výšky prvků profilu pro vzorek OXY15 strana A.....	74
Tabulka 2.52: Toleranční pole úchylky kolmosti pro vzorek OXY15 strana B.....	75

Tabulka 2.53: Toleranční pole průměrné výšky prvků profilu pro vzorek OXY15 strana B.....	75
Tabulka 2.54: Toleranční pole úchylky kolmosti pro vzorek OXY20 strana A. ....	76
Tabulka 2.55: Toleranční pole průměrné výšky prvků profilu pro vzorek OXY20 strana A.....	76
Tabulka 2.56: Toleranční pole úchylky kolmosti pro vzorek OXY20 strana B.....	77
Tabulka 2.57: Toleranční pole průměrné výšky prvků profilu pro vzorek OXY20 strana B.....	77

## Seznam obrázků:

Obrázek 1.1: Zápalná teplota.....	18
Obrázek 1.2: Změna zápalné teploty v závislosti na obsahu uhlíku.....	19
Obrázek 1.3: Využití tepla plamene a reakčního tepla při řezání kovů.....	20
Obrázek 1.4: Řez dýzou pro řezání kovů kyslíkem.....	20
Obrázek 1.5: Seřízení plamene pro řezání kovů kyslíkem.....	21
Obrázek 1.6: Znázornění procesu řezání kyslíkem.....	22
Obrázek 1.7: Změna stavu látky v závislosti od teploty.....	23
Obrázek 1.8: Základní konfigurace hořáku pro plazmový oblouk.....	25
Obrázek 1.9: Teploty v otevřeném elektrickém oblouku (a) a plazmovém paprsku (b).....	26
Obrázek 1.10: Styk plazmového paprsku s řezaným materiálem.....	27
Obrázek 1.11: Tvary hran řezu.....	27
Obrázek 1.12: Plazmové řezání.....	28
Obrázek 1.13: Transferovaný plazmový oblouk.....	28
Obrázek 1.14: Netransferovaný plazmový oblouk.....	28
Obrázek 1.15: Plazmový stůl.....	29
Obrázek 1.16: a) plazmový oblouk – plasma arc b) plazmový paprsek – plasma jet.....	30
Obrázek 1.17: Druhy plazmových hořáků s rozdílným chlazením.....	31
Obrázek 2.1: Základní tvar a rozměry vzorku.....	33

Obrázek 2.2: OLYMPUS SZX7 detail 1.....	34
Obrázek 2.3: OLYMPUS SZX7 detail 2.....	34
Obrázek 2.4: OLYMPUS SZX7 detail 3.....	34
Obrázek 2.5: Rozdělení oblastí při měření rychlosti řezání.....	35
Obrázek 2.6.1: Zaoblení horní hrany řezu.....	40
Obrázek 2.6.2: Fotka vady 4.1.1.....	40
Obrázek 2.7.1: Nepravidelný profil řezu.....	40
Obrázek 2.7.2: Fotka vady 4.2.1.5.....	41
Obrázek 2.8.1: Místní odchylka.....	41
Obrázek 2.8.2: Fotka vady 4.2.2.3 detail 1.....	41
Obrázek 2.8.3: Fotka vady 4.2.2.3 detail 2.....	42
Obrázek 2.9.1: Nadměrná hloubka.....	42
Obrázek 2.9.2: Nepravidelná hloubka.....	42
Obrázek 2.9.3: Fotka vady 4.2.2.5.....	42
Obrázek 2.10.1: Nerovný řez.....	43
Obrázek 2.10.2: Fotka vady 4.2.5.....	43
Obrázek 2.11.1: Ulpělá struska na spodní hraně.....	43
Obrázek 2.11.2: Skvrna strusky na řezu.....	43
Obrázek 2.11.3: Fotka vady 4.3.....	44
Obrázek 2.12: Rozdělení oblastí při měření drsnosti.....	46
Obrázek 2.13: Měřicí místa na řezné ploše.....	50
Obrázek 2.14: Vpichy na řezných plochách po zkouškách tvrdosti.....	51
Obrázek 2.15: Tvrdoměr.....	52
Obrázek 2.16: Dělení vzorku.....	57
Obrázek 2.17: Svislý řez.....	58
Obrázek 2.18: Průměrná výška prvků profilu.....	58
Obrázek 2.19: Svislý řez.....	59
Obrázek 2.20: Úchylka kolmosti, u – tloušťka zpracovaného vzorku do 30 mm .....	60
Obrázek 2.21: Průměrná výška prvků profilu, Rz5 – tloušťka zpracovaného vzorku do 30 mm .....	61
Obrázek 2.22: Vzorek PL4 strana A.....	62

Obrázek 2.23: Vzorek PL4 strana B.....	63
Obrázek 2.24: Vzorek PL10 strana A.....	64
Obrázek 2.25: Vzorek PL10 strana B.....	65
Obrázek 2.26: Vzorek PL15 strana A.....	66
Obrázek 2.27: Vzorek PL15 strana B.....	67
Obrázek 2.28: Vzorek PL20 strana A.....	68
Obrázek 2.29: Vzorek PL20 strana B.....	69
Obrázek 2.30: Vzorek OXY4 strana A.....	70
Obrázek 2.31: Vzorek OXY4 strana B.....	71
Obrázek 2.32: Vzorek OXY10 strana A.....	72
Obrázek 2.33: Vzorek OXY10 strana B.....	73
Obrázek 2.34: OXY15 strana A.....	74
Obrázek 2.35: OXY15 strana B.....	75
Obrázek 2.36: OXY20 strana A.....	76
Obrázek 2.37: OXY20 strana B.....	77

## Seznam grafů:

Graf 2.1: Plazmou řezané vzorky o jakosti S355.....	37
Graf 2.2: Plazmou řezané vzorky o jakosti S235.....	38
Graf 2.3: Kyslíkem řezané vzorky o jakosti S355.....	38
Graf 2.4: Kyslíkem řezané vzorky o jakosti S235.....	39
Graf 2.5: Měření drsnosti vzorku řezaného plazmou materiálu S355.....	48
Graf 2.6: Měření drsnosti vzorku řezaného plazmou materiálu S235.....	48
Graf 2.7: Měření drsnosti vzorku řezaného kyslíkem materiálu S355.....	49
Graf 2.8: Měření drsnosti vzorku řezaného kyslíkem materiálu S235.....	49
Graf 2.9: Měření tvrdostí na vzorku PL20.....	53
Graf 2.10: Měření tvrdostí na vzorku PL15.....	53
Graf 2.11: Měření tvrdostí na vzorku PL10.....	54
Graf 2.12: Měření tvrdostí na vzorku PL4.....	54



Graf 2.13: Měření tvrdostí na vzorku OXY20.....	55
Graf 2.14: Měření tvrdostí na vzorku OXY15.....	55
Graf 2.15: Měření tvrdostí na vzorku OXY10.....	56
Graf 2.16: Měření tvrdostí na vzorku OXY4.....	56

## Seznam použitých značek a symbolů

VŠB TUO ... Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava

ČSN EN ... česká technická norma, která přejímá evropskou normu

ČSN EN ISO ... česká technická norma, která zavádí do soustavy českých norem evropskou normu identickou s mezinárodní normou

### **Oceli zařazené ve skupině 1 a tedy označeny podle způsobu použití, mechanických a fyzikálních vlastností:**

S ... konstrukční ocel

P ... tlakové nádoby

L ... na potrubí

E ... na strojní součásti

B ... betonářská výztuž

R ... na kolejnice

### **Prvky SI soustavy**

H ... vodík

O ... kyslík

C ... uhlík

Fe ... železo

Ar ... argon

N ... dusík

Xe ... Xenon

### **Obecné značky a symboly**

mm ... milimetr  
m ... metr  
kg ... kilogram  
t ... tuna  
MPx ... mega pixel  
kJ ... kilojoule  
W ... watt  
mol ... mol  
°C ... stupeň Celsia  
°K ... stupeň Kelvina  
min ... minuta  
s ... sekunda  
T ... teplota [°C]  
dB ... Decibel  
v ... rychlost [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]  
s ... dráha [mm]  
t ... čas [s]  
n ... počet měření  
x ... naměřená hodnota  
t ... tloušťka [mm]  
k ... koeficient  
μm ... mikrometr  
Obr ... obrázek  
Tab ... tabulka  
% ... procento  
HV ... tvrdost podle Vickerse  
NC ... Numerical control  
CNC ... Computer numerical control  
3D ... trojrozměrný  
TOO ... tepelně ovlivněná oblast  
VT ... vizuální kontrola

a ... výška [mm]

b ... šířka [mm]

Ra – střední aritmetická úchylka profilu [HV]

Rz5 – výška nerovnosti profilu určená z 5 bodů [HV]

PL – plazma

OXY – plamen

CPQR – Cutting Procedure Qualification Records (návrh jak tyto procesy kvalifikovat)

ln – celková vyhodnocovací délka

lr – základní délka (1/5 z ln)

u (L3) – úchylka kolmosti řezu

$\Delta a$  – vzdálenost od horní a dolní hrany řezu

Bar – Bar (jednotka tlaku)

## Úvod

Tato diplomová práce se zabývá kontrolou plechů řezaných plazmou a kyslíkem. Na těchto vzorkách je provedeno několik testů pro získání výsledných hodnot. Všechny zkoušky a testy jsou provedeny dle aktuálních norem. Práce je rozdělena do dvou částí.

První část je nazvána teoretická, která seznamuje s předmětem normy ČSN EN ISO 9013. Dále popisuje teoretické základy dělení materiálu kyslíkem a všechny s tímto tématem související podkapitoly, kterými jsou řezání kovu kyslíkem a řezání kovů kyslíkem pomocí prášků. Druhou použitou a zde popsanou metodou je řezání plazmou. Všechny s tímto tématem související podkapitoly jsou vznik plazmy, princip dělení materiálu plazmou, zařízení pro dělení plazmou, kvalita povrchu řezu a vlastnosti plazmového řezání.

Druhou částí je část praktická, ve které je obsaženo vše ohledně prováděných zkoušek a kontrol na zkušebních vzorkách pálené plazmou a plamenem. Významný strojírenský závod, poskytl zkušební materiál S355 a S235, který za použití strojů byl rozdělen, jak plazmou, tak i plamenem. Zkušební vzorek má přesně určený tvar pro lepší provádění kontrol a testů a pro odhalení různých nepřesností dělení. Během procesu řezání byly odměřeny časy u jednotlivých ploch pro přepočet řezné rychlosti. Za pomoci znalosti času a délky dráhy se získaly jednotlivé řezné rychlosti pro každou plochu zvlášť. Vzorky byly z firmy odvezeny pro následnou vizuální kontrolu. Na vzorku byly změřeny největší rozměry (délka a šířka). Vizuální kontrola, byla provedena dle ISO 17658. Dále byla změřena drsnost na řezných plochách. Byl použit přístroj Mitutoyo SJ – 301, který změřil hodnoty Ra a Rz na rovinných řezných plochách. Předposledním zkoušením je měření tvrdosti, kde se za pomoci tvrdoměru měřila tvrdost jednotlivých řezných ploch. Použita byla metoda Vickerse. Posledním provedeným testem je test makrostruktury, kde je kontrolována úchylka kolmosti řezu „u“ a průměrná výška prvků profilu Rz5.

## 1. Teoretická část

### 1.1 Předmět normy ČSN EN ISO 9013

Tato mezinárodní norma se používá pro materiály vhodné pro řezání kyslíkovým plamenem, plazmové řezání a řezání laserem. Platí pro řezy plamenem od 3 mm do 300 mm, řezy plazmou od 1 mm do 150 mm a řezy laserem od 0,5 mm do 40 mm. Tato mezinárodní norma zahrnuje geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti povrchu řezu.

Geometrické požadavky na výrobky platí, pokud je na výkresech nebo souvisejících dokumentech, např. v dodacích podmínkách, uveden odkaz na tuto mezinárodní normu.

Pokud by tato mezinárodní norma měla být výjimečně použita také pro části, které byly vyrobeny použitím jiné metody dělení (např. řezání vysokotlakým vodním paprskem), musí to být dohodnuto jednotlivě [1].

#### 1.2.1 Teoretické základy dělení materiálu kyslíkem

Řezání kovů kyslíkem bylo původně pokládáno za pomocnou, resp. podřadnou výrobní činnost. Dnes je tato metoda dělení postavena na úroveň třískového obrábění. Stav povrchu opracovaného (řezaného) kyslíkem, je při správném použití této metody takové jakosti, že výpalky (kyslíkem vyřezané díly) není nutné v mnoha případech opracovávat. Tak se zavedl pojem přesného řezání.

Při řezání kyslíkem je materiál místně ohřát plamenem (směsí topného plynu s kyslíkem) na zápalnou teplotu a v proudu kyslíku je spalován tak, že vznikne řezná spára. Topné plyny, které se používají ke svařování a řezání plamenem, vč. jejich vlastností jsou uvedeny v tabulce 1.1 [2].

Tabulka 1.1: Vlastnosti topných plynů pro svařování a řezání plamenem [2]

Vlastnosti	Rozměr	Acetylen	Svítliplyn	Vodík	Propan	Zemní plyn
Měrná hmotnost	$\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$	1,17	0,50	0,09	2,02	0,75 až 1,00
Horní výhřevnost	$\text{kJ} \cdot \text{m}_n^{-3}$	59 000	Asi 17	12 750	105 000	37 600 až 46
Spodní výhřevnost		56 800	Asi 15	10 750	92 000	33 900 až 45
Hranice zápalnosti na	Objem. %	3 až 82	6 až 35	4 až 75	2,1 až 9,5	5 až 15
Hranice zápalnosti v kyslíku		3 až 93	-	4,5 až 95	2 až 48	-
Nejnižší zápalná teplota na vzduchu	$^{\circ}\text{C}$	335	560	510	510	640
Nejnižší zápalná teplota		300	450	450	490	640
Rychlost hoření na vzduchu	$\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	131	64	267	32	40
Rychlost hoření v kyslíku		1 350	705	890	~400	-
Měrný výkon plamene	$\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	44,70	12,55	13,80	10,45	12,55
Teplota plamene v kyslíku	$^{\circ}\text{C}$	3 200	Asi 2 700	2 000	2 800	2 750
Teoretická spotřeba kyslíku	$\text{m}_n^{-3} \cdot \text{m}_n^{-3} \text{ t.p.}^{*})$	2,5	0,84	0,5	5	-
Obvyklé míšící poměry	$\text{m}_n^3 \text{O}_2 \cdot \text{m}_n^{-3} \text{ t.p.}^{*})$	1,00 až	0,60 až	0,25 až	3,00 až	1,50 až 2,00

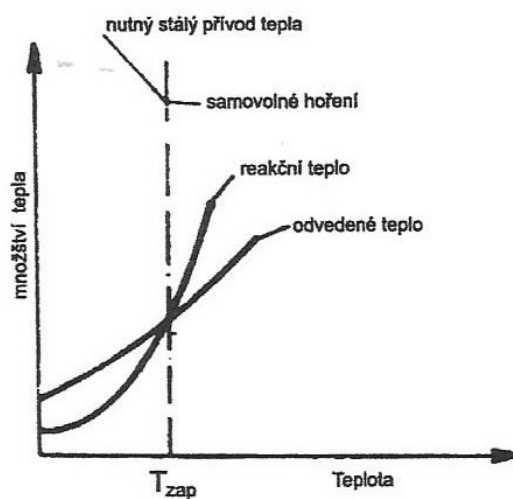
<sup>\*)</sup> t.p. – Topný plyn

### 1.2.2 Řezání kovu kyslíkem

Metodu řezání kovů kyslíkem bez prášků lze rozdělit na dílčí procesy:

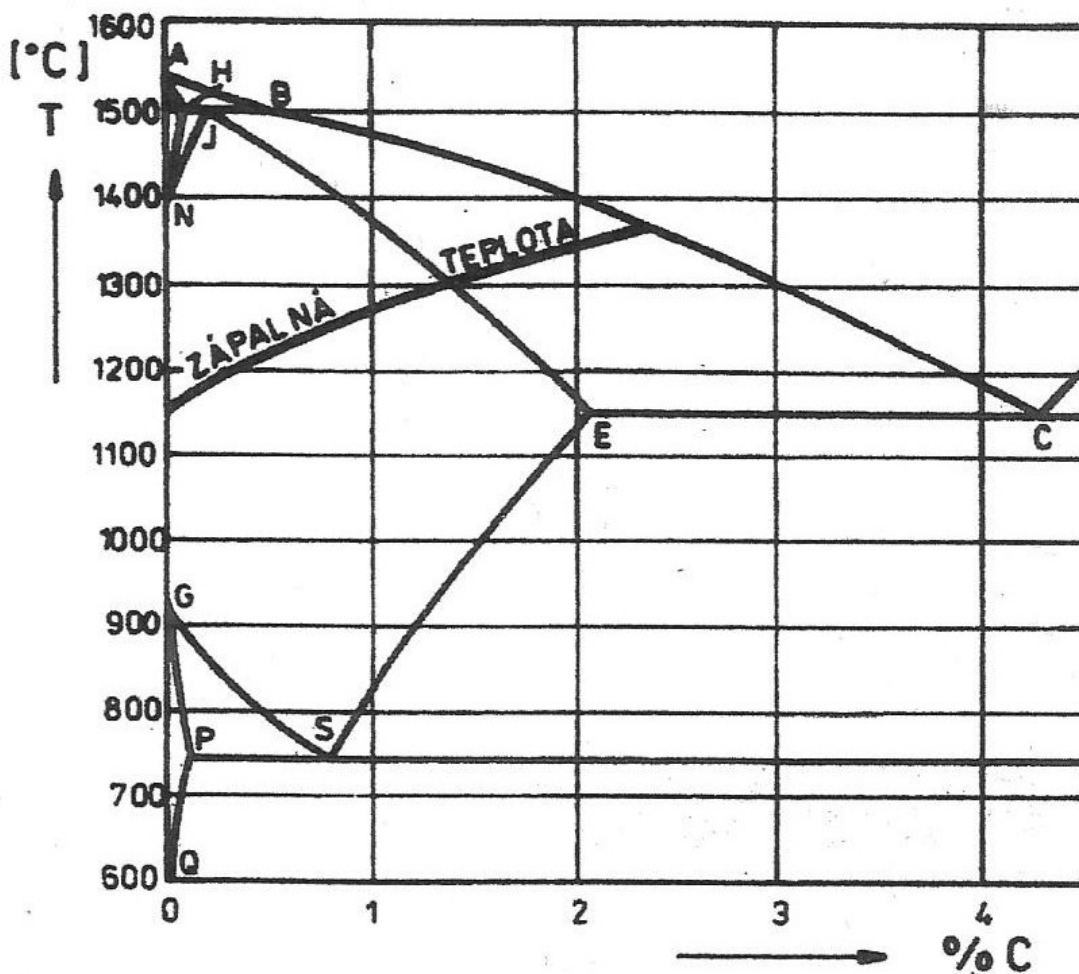
- ohřev kovu na zápalnou teplotu,
- oxidace kovu,
- vyfukování roztaveného produktu z řezné spáry.

Ohřev na zápalnou teplotu se uskuteční pomocí ohřívacího plamene. Zápalnou teplotou se míní teplota, při které kov intenzivně reaguje s kyslíkem a kdy v časové jednotce je množství uvolněného tepla větší, než množství tepla odvedeného (obr. 1.1). Zápalná teplota železa je  $1150^{\circ}\text{C}$ . U ocelí se stoupajícím obsahem uhlíku tato teplota stoupá (obr. 1.2) [2].



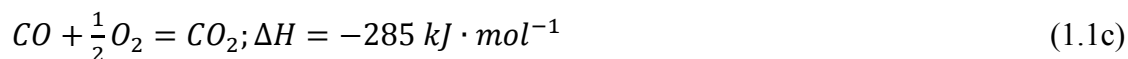
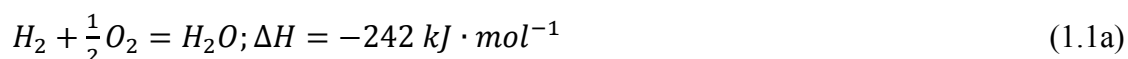
Obr. 1.1: Zápalná teplota  $T_{zap}$  [2]





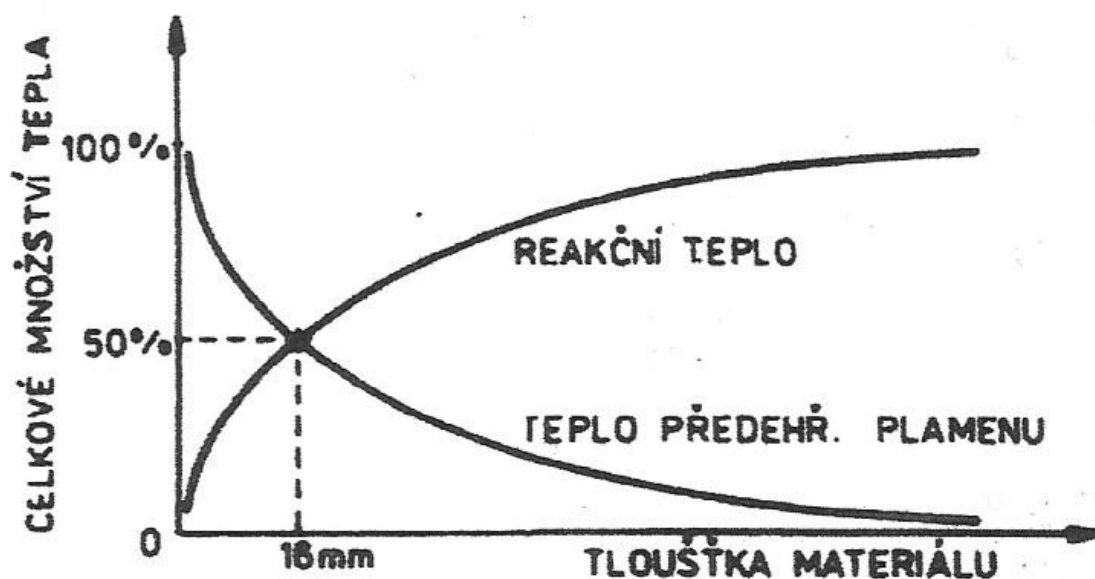
Obr. 1.2: Změna zápalné teploty v závislosti na obsahu uhlíku [2]

Topným plynem často bývá acetylén. Základní reakce při interakci kyslíku se složkami topného plynu (platí pro všechny uhlovodíky) jsou:



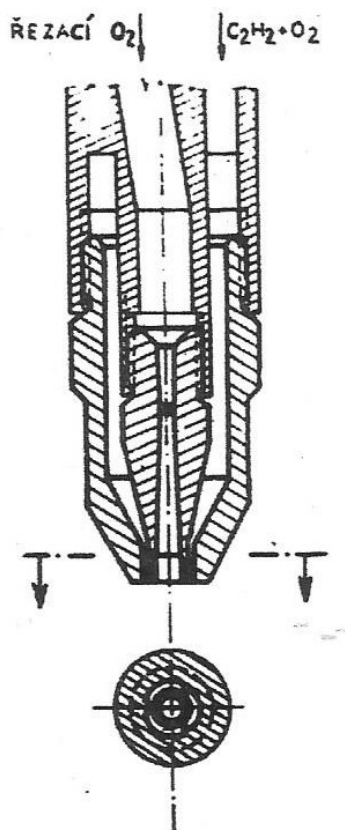
Uvolněné reakční teplo je na ohřívání přeneseno konvekcí a zářením. Tepelný obsah plamene je závislý na druhu topného plynu a na vzájemném směsném poměru. Ke správnému hodnocení plamene je nutno brát v úvahu ještě tepelnou vodivost řezaného materiálu a uvolněné teplo vzniklé spálením kovu.

Při řezání materiálu se uvolňuje teplo, které podporuje proces řezání. Teplo vzniklé v předeřívacím plameni je nutné pro zajištění plynulého procesu a pro krytí ztrát určitého množství tepla, které vznikly vyzářením a vedením (obr. 1.3). Z obrázku je také patrný rozdíl uplatnění obou tepelných zdrojů v závislosti na tloušťce materiálu [2].



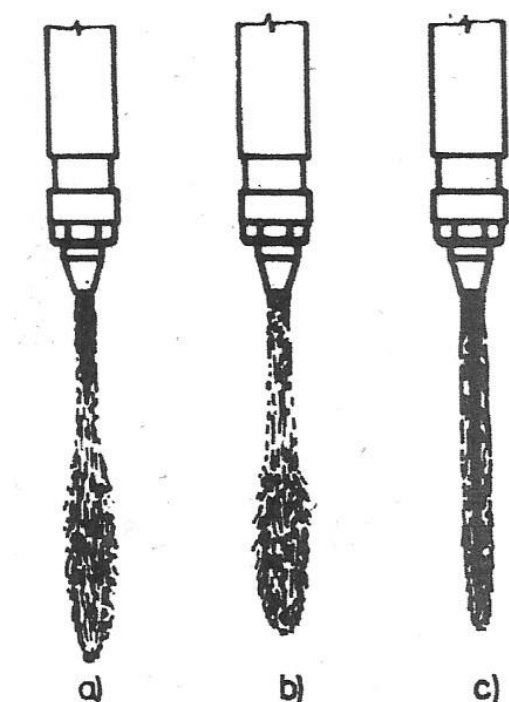
Obr. 1.3: Využití tepla plamene a reakčního tepla při řezání kovů [2]

Pro proces řezání je důležitá rychlost hoření topného plynu. Z tabulky 1.1 vyplývá, že nejvyšší rychlost hoření i největší výkon plamene vykazuje acetylen, což má svůj zvláštní význam. To znamená, že před ústí řezací dýzy (obr. 1.4) při hoření acetyleny nastane velká koncentrace tepla. U jiných, pomaleji hořících plynů se stejné množství tepla rozdělí rovnoměrněji na delší dráhu (tj. po tloušťce řezného materiálu). Vysoká koncentrace tepla u ústí dýzy je výhodná při řezání menších tloušťek materiálu (obr. 1.3), zatímco tlustší materiály vyžadují tepelné působení plamene do hloubky [2].



Obr. 1.4: Řez dýzou pro řezání kovů kyslíkem [2]

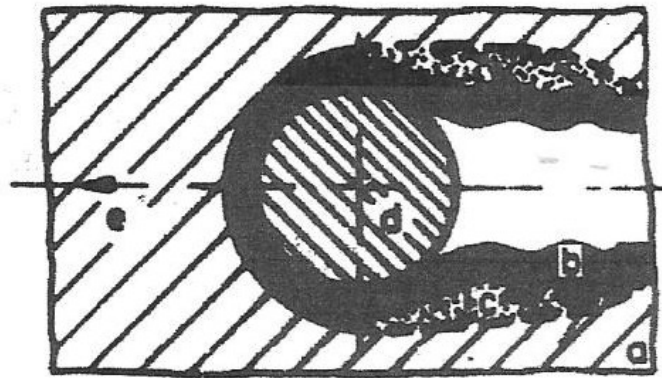
Kyslík používaný k řezání má mít čistotu min. 99,3 %. Každá desetina procenta vyšší čistoty kyslíku zlepšuje proces řezání. Čistota kyslíku se projeví zvýšením rychlosti řezání. Také ulpívání strusky na spodních hranách řezné plochy je znakem čistoty použitého kyslíku, za předpokladu, že je použito správné velikosti dýzy a správného seřízení plamene (obr. 1.5) [2].



Obr 1.5: Seřízení plamene pro řezání kovů kyslíkem [2]

- a) Ohřivací plamen s přebytkem acetylénu.
- b) Neutrální ohřivací plamen.
- c) Správný tvar a délka paprsku řezného kyslíku.

Proces řezání oceli kyslíkem je znázorněn na obr. 1.6. Přednostně probíhá spalování Fe na FeO. Tekutý produkt spalování je ale na stykových plochách s řeznou spárou ochlazován v důsledku odvodu tepla do řezaného materiálu a tuhne na plochách (stěnách) řezné spáry. Tak vzniká téměř izolační vrstva mezi řezným paprskem kyslíku a základním materiálem. Čím rychleji produkt řezání (struska) tuhne, tím silnější je vrstva strusky a rychlost řezání klesá. Z toho plyne, proč lze předehřáté materiály rychleji řezat. Např. při teplotě 700 až 900°C lze rychlost řezání trojnásobně zvýšit v porovnání s nepředehřátým materiálem. To znamená, že při řezání nepředehřátých materiálů nelze dosáhnout horní hranice rychlosti oxidace kovu. Zde je nutné brát v úvahu i teplotu proudu řezného kyslíku. Experimentálně bylo zjištěno, že v ose proudu řezacího kyslíku jsou teploty velmi nízké, blízké 0°C [2].



- a) Základní materiál
- b) Tavenina
- c) Oxidická vrstva
- d) Proud řezného plynu
- e) Směr řezání

Obr. 1.6: Znázornění procesu řezání kyslíkem [2]

### 1.2.3 Řezání kovů kyslíkem pomocí prášků

Řezací procesy pomocí prášků se používaly u dělení materiálů, které byly klasickým způsobem podmíněně řezatelné nebo obtížně řezatelné.

**Metoda řezání pomocí křemičitého prášku (písku)** používá k odstranění oxidů z řezné spáry křemenný písek. Tato metoda je založená na mechanickém působení křemičitého písku, jehož zrnka v důsledku své kinetické energie protřhají oxidický povlak a současně produkty řezání odstraňují z řezné spáry.

**Metoda řezání pomocí práškových tavidlových přísad.** Jedná se o práškové tavidlo sestávající hlavně z uhličitanu sodného a hydrogenuhličitanu sodného. Úkolem tavidla, přiváděného do řezné spáry proudem řezacího kyslíku, je změnit chemické složení oxidů s vysokým bodem tavení, např. oxid chromu, na alkalické řídce tekoucí strusky, které jsou lehce odstranitelné. Odstraňování oxidů se děje nejen chemickou cestou, ale také mechanickým způsobem částic tavidla. Využívání této metody bylo nepatrné

Metoda řezání pomocí železného prášku. Železný prášek je přiváděn stlačeným vzduchem do ohřívacího plamene a přechází do paprsku řezného kyslíku a tak se dostane do reakčního pásma v řezné spáře. Působení železného prášku je následující [2]:

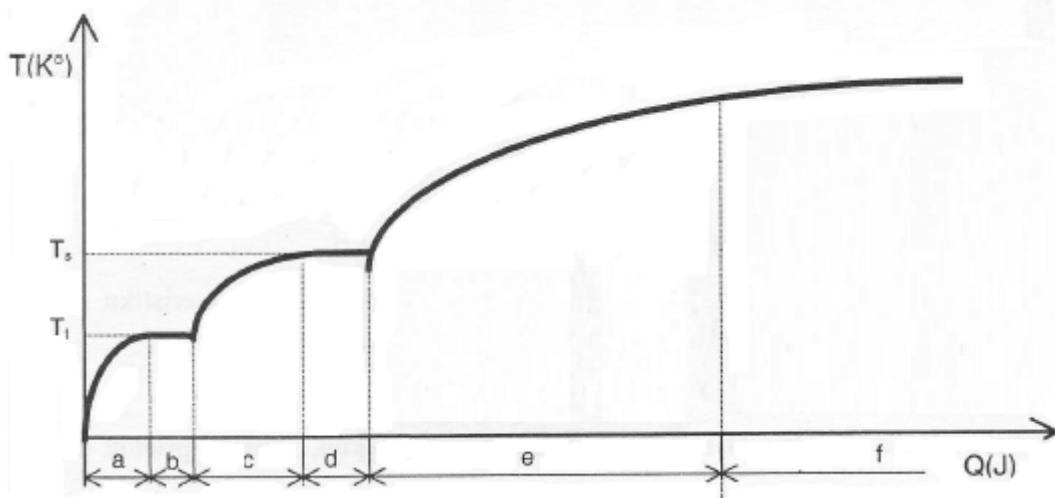
- zvýšení množství reakčního tepla a tím se zvýší tekutost oxidů,
- upravuje viskozitu strusky
- napomáhá k odstranění strusky z řezné spáry

### 1.3.1 Řezání plazmou

Plazmový způsob řezání se začal používat začátkem 50. let 20. Století jako alternativní způsob řezání hliníkových a jiných neželezných materiálů namísto řezání kyslíkovým plamenem.

Plazma, jako čtvrté skupenství látky, je elektricky vodivý stav plynu, který se na Zemi vyskytuje jen výjimečně. Vzniká ionizací plynu při vysokých teplotách nad 20 000°C, nebo jako elektrický výboj mezi anodou a katodou [3].

Při použití plazmy se v praxi setkáváme s postupnou změnou tuhého stavu látky až po plazmatický stav. Tato postupná změna v závislosti od teploty je znázorněna na obr. 1.7 [5].



Obr. 1.7: Změna stavu látky v závislosti od teploty [5].

$T_t$  – teplota tavení

$T_s$  – Teplota vypařování kapaliny

a- ohřev tuhé látky

b – skupenské teplo tavení

c – ohřev kapaliny

d – skupenské teplo vypařování

e – ohřev plynu

f – plazmový stav

Pro zvláštní stav plynu, při kterém se plyny stávají vodivými, zavedl **I. Langmuir** v roce 1923 fyzikální pojem plazma. Termín plazma se používá pro označení velkého počtu částic (atomů, molekul iontů, elektronů) bez pevné vzájemné vazby, z kterých aspoň některé mají elektrický náboj a v dostatečně velkém objemu je součet kladných a záporných elektrických nábojů nulový.

První teoretické práce z problematiky plazmového oblouku stabilizovaného vodou uveřejnili v roce 1922 **Gerdien** a **Lotz**. První průmyslné zařízení používající plazmu na řezání byli provozovány kolem roku 1955 [3]

### 1.3.2 Vznik plazmy

Plazma je stav hmoty odborně nazývaná jako ionizovaný plyn, který obsahuje částice záporně nabitých elektronů a kladně nabitých iontů. Koncentrace těchto dvou elementů v plazmě je velmi vysoká a jejich objemová hustota je stejná. Plazma může vzniknout několika způsoby. Druhý způsob, který se používá v technické praxi, je vznik plazmy pomocí elektrického výboje mezi anodou a katodou. To znamená, že elektrická energie se mění v tepelnou.

Při tomto vzniku plazmy, je plyn jen částečně ionizovaný a dosahuje teploty maximálně 20 000°K, v závislosti na druhu ionizovaného plynu. Teplota úplně ionizovaného plynu dosahuje 100 000°K, ovšem ta je v běžné praxi nedosažitelná.

Jelikož plazma obsahuje oproti plynům volné částice, je elektricky a magneticky vodivá a schopna vytvářet elektrické a magnetické pole. Efekt vytváření polí zapříčiňuje jev zvaný kvazi-neutralita. Tento jev vzniká v důsledku stejné objemové hustoty iontů a elektronů. Jak už bylo zmíněno, za klidného stavu plazma vystupuje jako neutrální ionizovaný plyn.

Důležitým faktorem, který ovlivňuje dělení materiálu je stabilizace plazmy, jelikož se vyskytuje v nestabilní podobě. Název stabilizace znamená udržet plazmu v tenkém válcovém paprsku po dobu nezbytně nutnou k rozdělení materiálu. Plazmu je možno stabilizovat ověřenými postupy [3], [4]:

- tvarem dýzy plazmového hořáku,
- proudícím plynem
- vodou.

Na dosažení technicky kvalitní plazmy je potřebné sledovat parametry tvořící plazmu [3]:

- teplotu a elektrickou vodivost (zvyšováním velikosti proudu se zvyšuje teplota a elektrická vodivost plazmy),
- hustotu proudu plazmy,
- průměr paprsku,
- stupeň vzdálenosti paprsku po výstupu z dýzy.

Na vlastnosti plazmy mají vliv používané plyny, které se podle funkce dělí na [3]:

- plazmové plyny, které jsou přivedené přímo do oblouku, kde jsou ionizované, jako argon (Ar), argon a vodík (Ar + H<sub>2</sub>), hélium (He), dusík (N<sub>2</sub>), CO<sub>2</sub>, vzduch,
- fokusační plyny, které slouží k zúžení paprsku při jeho výstupu z dýzy plazmového hořáku, nejčastěji se používá argon (Ar), argon a vodík (Ar + H<sub>2</sub>), argon a dusík (Ar + N<sub>2</sub>), dusík (N<sub>2</sub>),
- Ochranné plyny, které obklopují plazmový paprsek a oblast tavení materiálu a chrání ji před vlivem atmosféry, obvykle se používá argon.

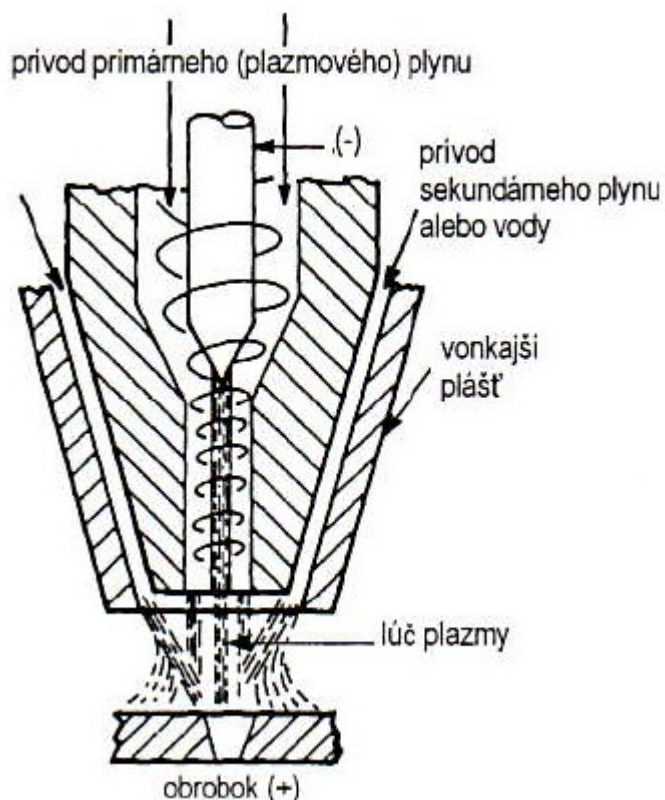
Pro názornost jsou v tabulce 1.2 uvedené ionizační potenciály některých vybraných plynů [5].

Tab. 1.2: Ionizační potenciál plynů [5].

Plyn	Ionizační potenciál (eV)	
	valenční elektrony	elektrony na sousední sféře
He	24,6	54,4
Ne	21,6	41,0
Ar	15,7	27,6
Kr	14,0	26,5
Xe	12,1	21,2
H	13,6	-
N	14,5	29,6
O	13,6	35,1

Plazma se vytváří rozkladem molekul těchto plynů za vysokého vývinu tepla, při přechodu elektrického oblouku, který hoří mezi netavící se elektrodou (obvykle zápornou wolframovou katodou) a řezaným materiálem (kladnou anodou).

Obr. 1.8 znázorňuje základní konfiguraci plazmového hořáku, kde výboj vzniká mezi záporně nabitou elektrodou a kladně nabitým materiálem. Takto konstruovaný hořák se nazývá transferovaný hořák [3].

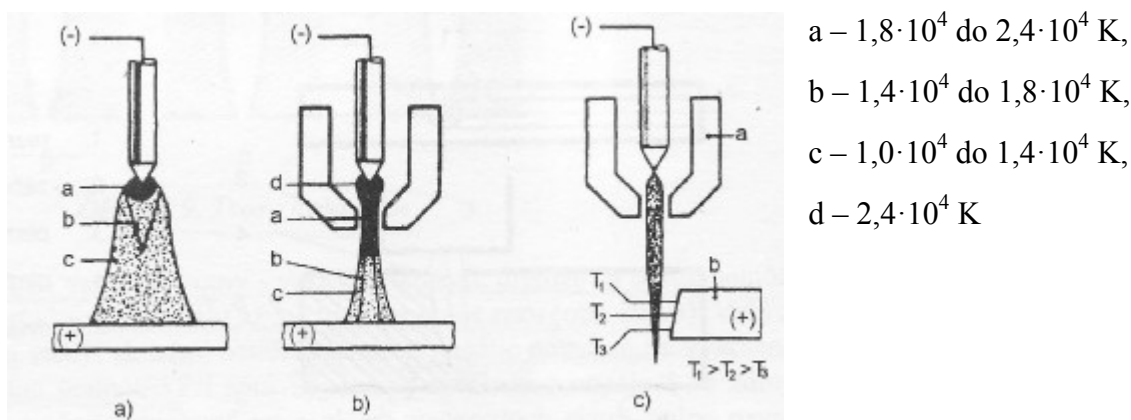


Obr. 1.8: Základní konfigurace hořáku pro plazmový oblouk. Záporně nabitá elektroda a kladně nabitý obrobek tvoří oblouk. Plazmový (primární plyn) je ionizovaný a ohřátý na vysokou teplotu. Sekundární přívod plynu chrání oblast tavení materiálu [3].



## Rozdělení teploty v paprsku plazmového hořáku

Na obr. 1.9 je porovnání teplot v otevřeném elektrickém oblouku a plazmovém paprsku [5].



Obr. 1.9: Teploty v otevřeném elektrické oblouku (a) a plazmovém paprsku (b) [5].

Na obr. 1.9 je uvedená podmíněná teplota na ploše řezu, přičemž a je plazmový hořák, b je obrobek,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  jsou teploty plazmy. Platí:  $T_1 > T_2 > T_3$ . Oblast a je charakterizována teplotami nad  $20\,000^\circ\text{C}$ , oblast b teplotou  $15\,000$  až  $20\,000^\circ\text{C}$  a v oblasti c se pohybují teploty do  $15\,000^\circ\text{C}$

Účinná délka plazmového paprsku bývá až 100 mm, obvykle 40 až 60 mm [5].

### 1.3.3 Princip dělení materiálu plazmou

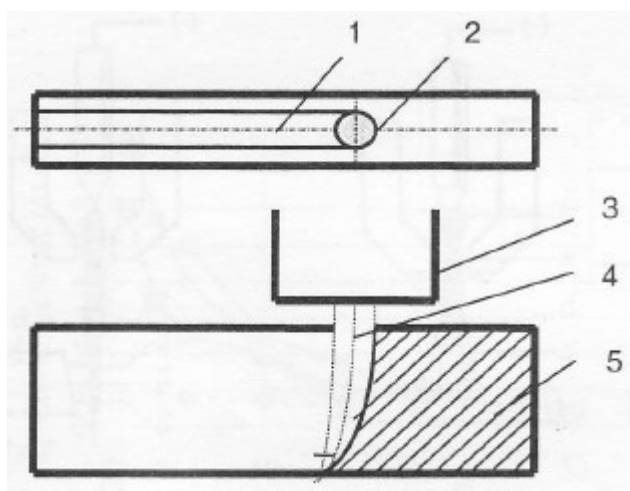
Dělení materiálu úzkým plazmovým paprskem pracuje na tepelném a dynamickém účinku plazmy. Plazmový paprsek vzniká pomocí elektrické energie a plazmového plynu mezi neodtavující se katodou a řezaným materiálem. Katoda je umístěna v dělicím hořáku a bývá vyrobena z wolframu, hafnia a dalších materiálů. Řezaný materiál je napojen na kladný pól a vytváří tak anodu. Paprsek vystupující z hořáku má velkou hustotu energie. Hustota je udávána  $10^8 - 10^9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . Tato hustota energie je měřena na makroskopické úrovni a je měřena jako střední hodnota dopadajícího paprsku na plochu obrobku.

Důsledkem působení paprsku se obráběný materiál taví, sublimuje, odpařuje a roztříkává. Dynamickým účinkem plazmového plynu je roztavený materiál z místa řezu odfukován ve formě tekutého kovu, a tak vzniká řezná mezera (obr1). Plazmový paprsek je stabilizován a chráněn před okolní atmosférou pomocí ochranného plynu nebo vody [4].

Na kvalitu řezu má vliv rozložení tepelného toku v řezné šterbině. Výborná kvalita řezu se dosahuje rovnoměrným přívodem tepla po celé tloušťce materiálu.

**Řezání s nezávislým obloukem** – je principiálně shodný s tavným řezáním plynovým hořákem. Tepelnou energii plazma získává v oblasti mezi vnitřní elektrodou a tryskou, která je anodou. Plazma proudící velkou rychlostí z trysky, má na rozdíl od spalín plynového hořáku několikanásobně větší osovou teplotu a tím také vyšší obsah energie.

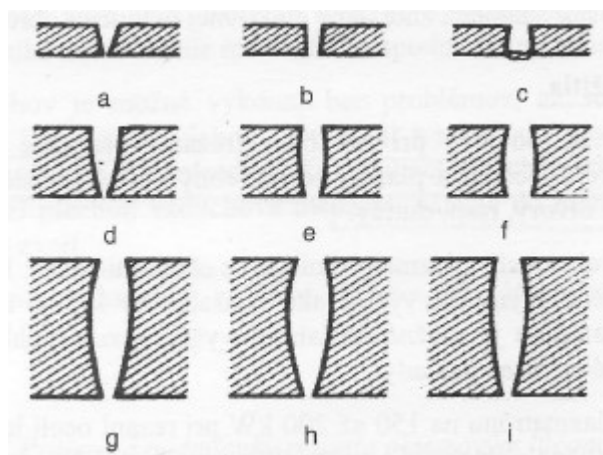
Rozdíl v bilanci přívodu tepla, způsobený rozdílným mechanismem přestupu tepla v horní a spodní části řezu, je kompenzované zešíkmením stykové plochy vůči ose paprsku plazmy. Styk plazmového paprsku s řezaným materiálem je schematicky znázorněn na obr. 1.10 [5].



- 1. řezná štěrbina
- 2. Záběrová plocha
- 3. Plazmový hořák
- 4. Plazmový paprsek
- 5. Materiál

Obr. 1.10: Styk plazmového paprsku s řezaným materiálem [5].

**Řezání se závislým obloukem** – Pro vodivé materiály je výhodnější plazmatron se závislým obloukem, který má lepší celkovou účinnost a umožňuje řezání materiálu s většími tloušťkami. V plazmatronech se závislým obloukem hoří oblouk mezi vnitřní elektrodou a řezaným materiálem, který je anodou. Tvary hran řezu při různých rychlostech a tloušťkách jsou znázorněné na obr. 1.11 [5].



Obr. 1.11: Tvary hran řezu [5].

Při nadměrné řezné rychlosti vznikají hrany s velkým úkosem, protože se oblouk nemůže natáhnout ani při malých tloušťkách materiálu až k spodní hraně řezu. Vzhled řezaných hran je stejný i v době, kdy zdroj nemá dostatečné napětí potřebné na zvětšení délky oblouku na požadovanou hodnotu [5].

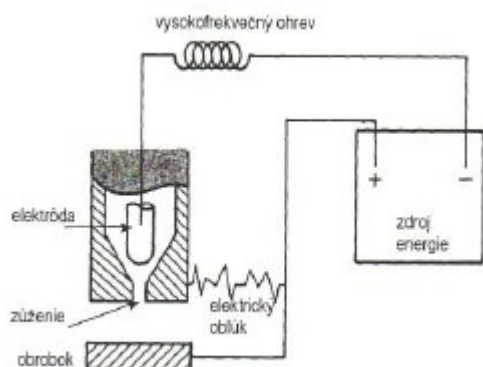


Obr. 1.12: Plazmové řezání [4].

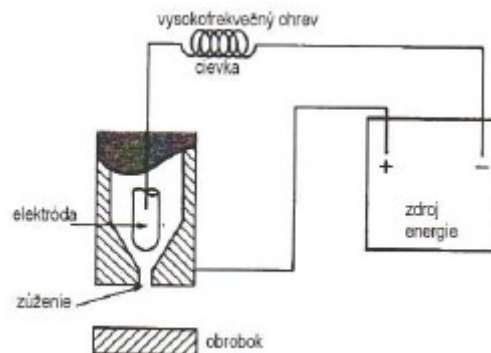
#### 1.3.4 Zařízení pro dělení materiálu plazmou

Plazmové zařízení se dělí na dva základní typy, které používají přenesený (transferovaný) a nepřenesený (netransferovaný) oblouk. Na obr. 1.13 je schéma zapojení transferovaného oblouku, na obr. 1.14 netransferovaného oblouku.

V prvním případě se elektrický oblouk tvoří mezi elektrodou uvnitř plazmového hořáku a materiálem. Pro takový plazmový paprsek se používá označení plazmový oblouk (plasma arc) [3].



Obr.1.13: Transferovaný plazmový oblouk [3].



Obr. 1.14: Netransferovaný plazmový oblouk [3].

Stroje, pro dělení materiálu plazmovým paprskem, lze rozdělit na ruční a strojní zařízení [4].

##### Ruční zařízení

Ruční zařízení pro dělení materiálu je konstruováno jako přenosné. Skládá se ze dvou částí, samotného zařízení (zdroj energie) a řezacího hořáku. Hořáky jsou z pravidla výměnné. Po výměně ručního hořáku za strojní a po upevnění do konzoly řezacího stolu, lze ruční zařízení použít mechanizovaně. Ruční zařízení se používá zejména pro dělení

menších tloušťek materiálu. Pro konstrukční ocel se maximální řezaná tloušťka pohybuje mezi 20 – 30 mm v závislosti na druhu zařízení a kvalitě řezu [4].

#### Strojní automatizované zařízení

Strojní zařízení se skládá z těchto základních částí:

- zdroj energie,
- řídicí jednotky,
- řezacího stolu včetně pohyblivého suportu,
- řezacího hořáku,
- kompresoru,
- filtračního zařízení,
- směšovací jednotky.

Řezací hořák je připevněn na suport, který se pohybuje po řezacím stole. Řezací stůl je propojen s filtračním zařízením, které odsává dýmy vzniklé při řezání materiálu. Pohyb hořáku zabezpečuje řídicí jednotka, vybavena NC nebo CNC řízením. Hořák je propojen kabely ke zdroji elektrické energie. Dále je propojen se směšovací jednotkou. Do směšovací jednotky jsou dodávány plyny z tlakových lahví. Jediný plyn nedodávaný z lahví je vzduch. Vzduch je nasávaný z atmosféry přes čistící jednotku, kompresorem stlačován a dodáván ke směšovací jednotce. Oproti ručnímu řezání je strojové mnohokrát výkonnější. Pro větší produktivitu práce se vyrábějí pracovní stoly, které jsou osazeny 2 i 3 řezacími hořáky. Takto osazené stoly se používají pro dělení tabulového plechu. Specializace mechanizované plazmy nekončí u dělení plechů, ale lze ji využít pro 3D dělení profilů, svařování a nanášení povlaků. Strojní zařízení je schopno rozdělit konstrukční ocel o tloušťce materiálu až 180 mm. Jako příklad dělicího zařízení je uveden pálicí stůl od firmy Vanad 2000 a.s. řady Kompak (obr. 1.15). Stůl je dodáván včetně všech komponentů. Je vyráběn univerzální a proto je na něj možno přimontovat i další technologie výroby, a to kyslíkové řezání, plazmové a mokroúderové značení, speciální navrtávací a frézovací hlavy [4].



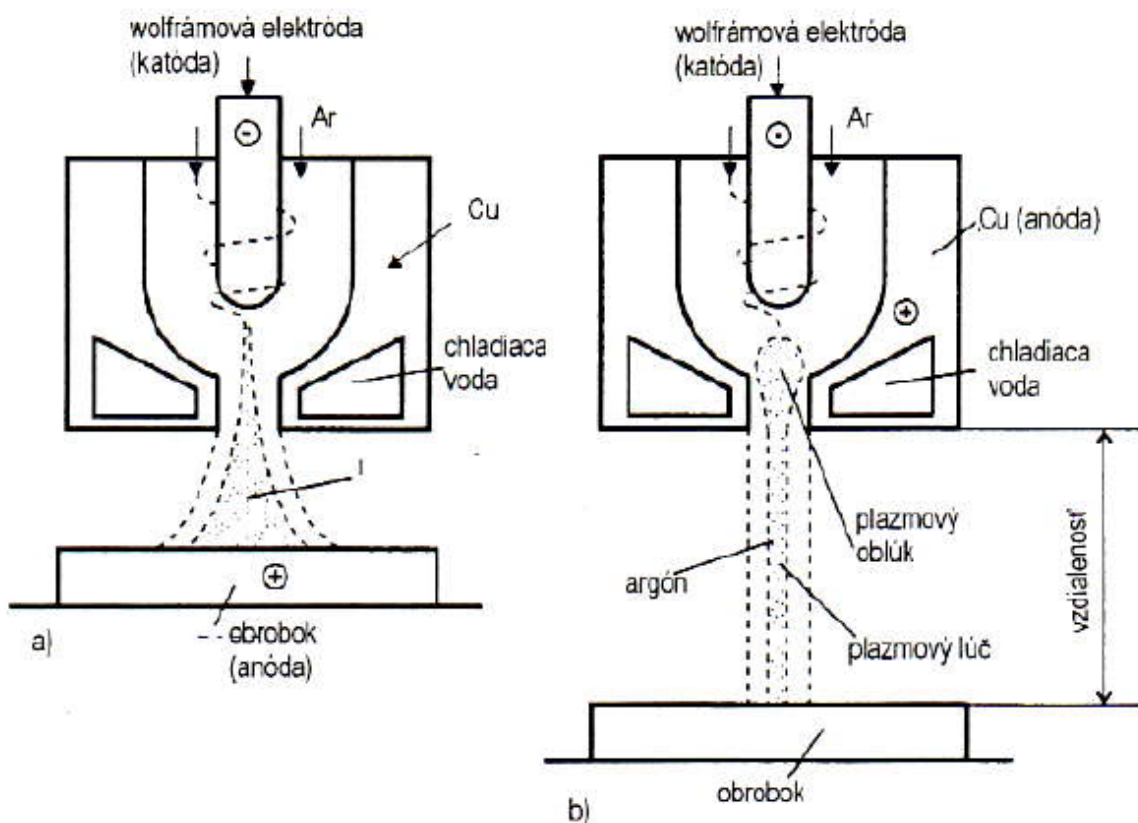
Obr. 1.15: Plazmový stůl [4].

Důležitou částí plazmového zařízení jsou plazmové hořáky, které musí zabezpečovat:

- přívod proudu na elektrodu (obvykle wolframovou),
- přívod pracovních plynů tj. plazmového, fokusačního a ochranného,
- tvarování plazmového oblouku,
- usměrnění paprsku na místo řezání.

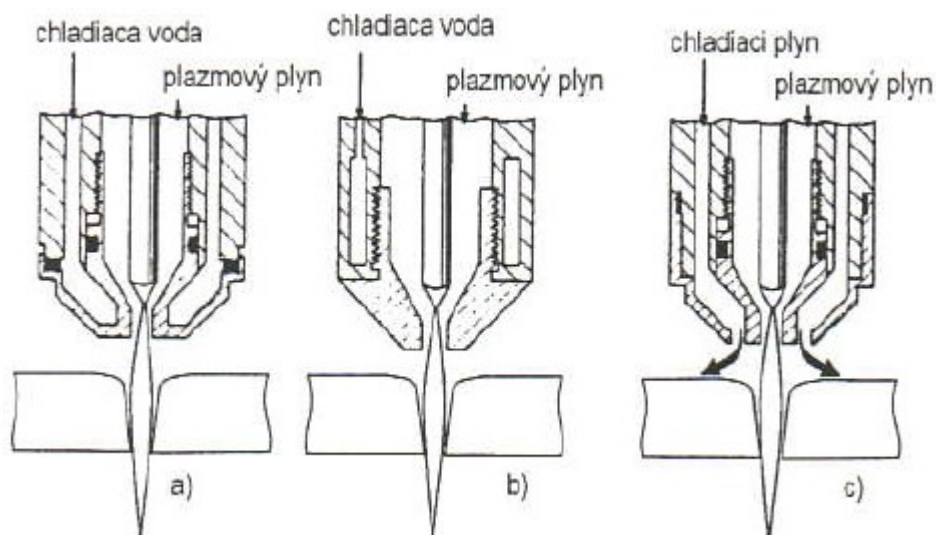
Plazmové hořáky je možné rozdělit podle:

- výkonu (výkon je daný součinem proudu a napětí oblouku),
- způsobu chlazení (přímé chlazení vodou, nepřímé chlazení vodou, chlazení plynem),
- složení plazmového plynu (oxidační, neoxidační),
- druhu materiálu katody (wolfram, zirkon, hafnium),
- pracovního systému hořáku (na principu stlačeného vzduchu, vstřikování vody a jiné),
- použití, na hořáky pro ruční nebo strojní řezání.



Obr. 1.16: a) plazmový oblouk – plasma arc b) plazmový paprsek – plasma jet [3].

Na dosažení úzkého svazku plazmy s vysokou teplotou je nevyhnutelné intenzivní chlazení, které je zabezpečeno konstrukcí plazmových hořáků. Hořák je chlazený kapalinou, obvykle vodou, nebo chladícím plynem. Výtoková dýza je odizolovaná od vodivých částí hořáku. Na obr. 1.17 jsou znázorněny používané druhy klasických plazmových hořáků s přímým i nepřímým chlazením vodou, obr. 1.17 a, b, chlazení pomocí průtoku plynu, obr. 1.17 c [3].



Obr. 1.17: Druhy plazmových hořáků s rozdílným chlazením: a) přímé chlazení vodou b) nepřímé chlazení vodou c) chlazení plynem [3].

### 1.3.5 Kvalita povrchu řezu

U plazmového pálení je kvalita povrchu určena zejména charakteristikou plazmatu. Základním faktorem je dosažená koncentrace energie v  $1 \text{ mm}^3$  sloupce plazmatu. Exaktně nepřesné, ale v praxi zcela dostatečné je hodnocení průměru plazmatu ve svazku v závislosti na výkonu v kW. Průměr plazmatu je proměnný s použitým řezným proudem a průměrem trysky. Např. u zdroje Plazma Prof 162, italského výrobce Cebora, S. p. A., je tato hodnota mimořádně příznivých 1,2 – 2,1 mm.

Jakost povrchu řezu závisí především na symetrii svazku a klesá při konci životnosti spotřebních dílů. Jestliže nesymetrie svazku je při užití nové trysky max. 0,05 mm, ke konci životnosti je nesymetrie až 0,3 mm. To způsobuje zhoršenou kvalitu povrchu řezu.

Použijeme-li jako médium ke zplazmování vzduch, má svůj značný význam i kvalita vzduchu. Je zřejmé, že vlhkost vzduchu způsobuje zhoršení kvality řezu. Naopak při užití jiných plynů lze kvalitu řezu značně zlepšit, ovšem pouze pro určité přesně vydělené materiály. Kupříkladu pro řezání chromniklové oceli se zdá nejvhodnější užití kyslíku jako média nejpříznivěji vzhledem ke kvalitě, ale při řezání žárovevné oceli jsou výsledky přímo katastrofální. Naopak velmi dobré výsledky podává dusík v obou případech. S použitým plynem lze operovat i v závislosti na síle řezaného materiálu.

Na straně pálicího stroje je faktorem přímo ovlivňujícím kvalitu řezu chvění pohonů a mechanická tuhost zavěšení hořáku. Zajímavé zjištění je, že při použití zmiňovaného zdroje Plazma Prof 162 na zastaralých pálicích strojích klesá rychlost řezu až o 15% díky chvění hořáku, který je tak donucen provádět větší řeznou spáru. Subjektivní hodnocení kvality řezu na zastaralých pálicích strojích dokonce vyznívá v jednoznačný neprospěch pro tento plazmový zdroj. Důvodem je velmi tenký řezný svazek naprosto přesně kopírující všechny záchvěvy pohonů a konstrukce přenesené na hořák [6].

### 1.3.6 Vlastnosti plazmového řezání

#### Výhody

- vyšší řezné rychlosti oproti autogenu pro malé a střední tloušťky
- snížení vneseného tepla – menší TOO a deformace
- možnost řezání i vysoce legovaných materiálů a barevných kovů
- snadná automatizace a mechanizace
- možnost úkosování
- řezání ruční nebo strojní

#### Nevýhody

- podřez je větší než u autogenu a laseru
- horní řezná hrana je oblejší než u autogenu
- velký vývin dýmu, ozónu a  $\text{NO}_x$
- vysoká hladina hluku okolo 100 dB
- obtížné propalování otvorů u tloušťek nad 15 mm, nutné předvrtání [8]



## 2. Praktická část

Praktická část se zabývá kvalifikací technologických postupů při řezání plazmou a plamenem dle pokynů týkající se postupů pro ověření a hodnocení procesů tepelného dělení v souladu s EN1090-2 a EN ISO 9013.

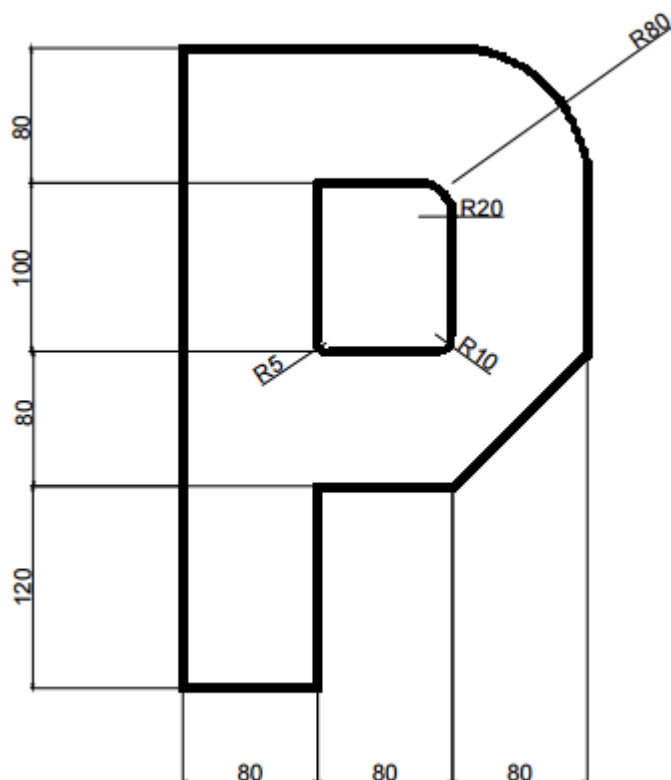
CPQR (návrh jak tyto procesy kvalifikovat) zahrnuje řadu kvalifikací, které mohou být použity. Rozsahy jsou uvedeny pro následující proměnné [7]:

- skupina materiálu,
- tloušťka materiálu,
- tlak plynu,
- řezná rychlost a výška,
- přehřívací teplota.

Významný strojírenský podnik poskytl plechy různých tloušťek a dvou skupin materiálu. Vzorky byly vyrobeny na portálovém řezacím zařízení, viz obr. 1.15.

Základní údaje z inspekčních certifikátů (jakost materiálu, tloušťka a uhlíkový ekvivalent) pro řezané vzorky jsou vloženy do přílohy č. 1. Plechy jsou rozděleny podle materiálu a následně tloušťky. Pro materiál S355 (tloušťky 4, 10, 15 a 20 mm) a pro S235 (tloušťky 5, 10, 16 a 20 mm).

Tvar a rozměry vzorku byly navrženy tak, abychom prověřili všechny možnosti řezání, přímé řezy, oblouky a vnitřní poloměry. Tvar a vzhled je uveden na obrázku 2.1.



Obr. 2.1: Základní tvar a rozměry vzorku.

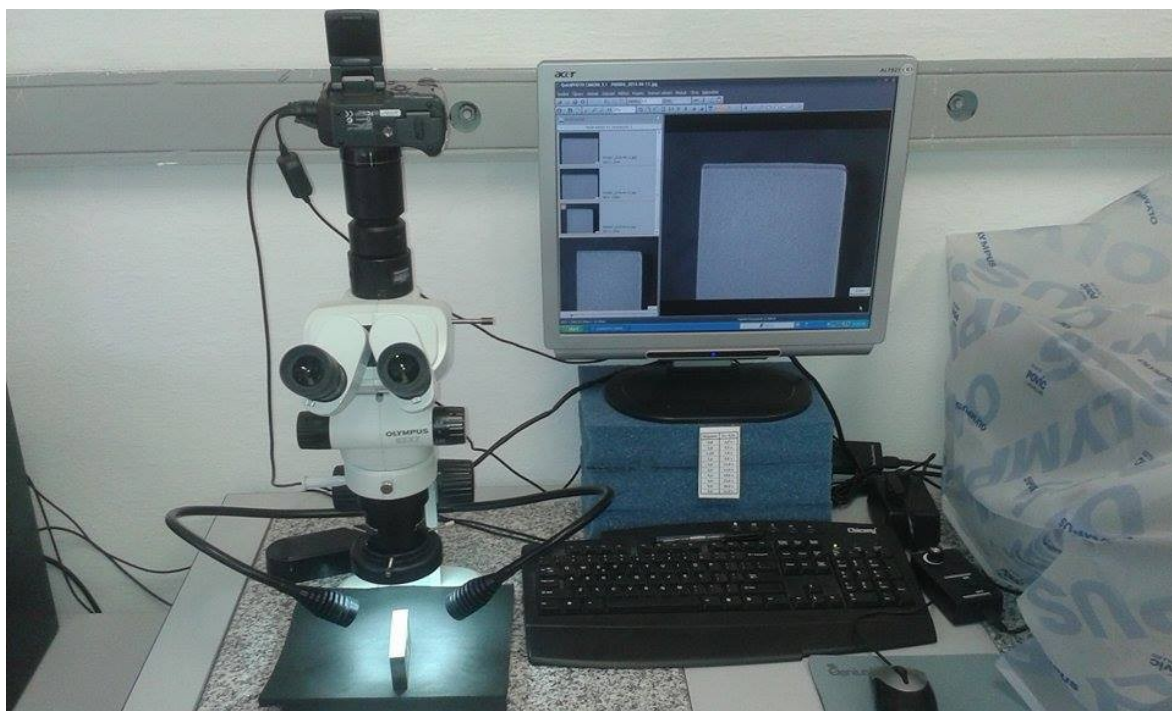
Všechny snímky byly pořízeny na fotoaparátu NIKON COOLPIX P7700, Samsung Galaxy Trend fotoaparát 5MPx a detaily pořízeny na OLYMPUS SZX7 (Obr. 2.2, obr. 2.3, obr. 2.4).



Obr. 2.2: OLYMPUS SZX7 detail 1



Obr. 2.3: OLYMPUS SZX7 detail 2



Obr. 2.4: OLYMPUS SZX7 detail 3

## Metodika řešení praktické části

Metodika řešení praktické části byla navržena dle následujících částí

1. Měření rychlosti řezání
2. Vizuální kontrola
3. Měření drsnosti
4. Měření tvrdosti
5. Makrostruktura

### 2.1 Měření rychlosti řezání

Měření času jednotlivých oblastí bylo provedeno při samotném řezání vzorků za pomoci stopek. Jednotlivé časy jsou uvedeny v tabulce, viz příloha č. 3. Jednoduchým vzorcem (2.1.1) byla získána rychlost v m/min.

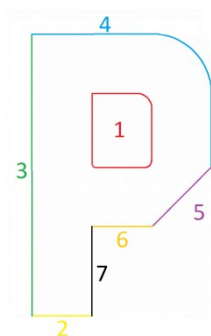
$$v = \frac{s}{t} \quad (2.1.1)$$

$v$  – rychlost [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]

$s$  – dráha [mm]

$t$  – čas [s]

Rozdělení jednotlivých oblastí při měření času je uvedeno na obr. 2.5.



Obr. 2.5: Rozdělení oblastí při měření rychlosti řezání.

V tabulce 2.1 jsou uvedeny jednotlivé délky v mm všech měřených oblastí.

Tab. 2.1: Délka dráhy jednotlivých oblastí.

Oblast	1	2	3	4	5	6	7
Dráha (mm)	344,95	80	380	385,6	113,14	80	120

### 1. Plazmou řezané vzorky o jakosti S355

Pro příklad je uveden výpočet pro tloušťku 4 mm materiálu S355. V tabulce 2.2 je napsáno, že první oblast byla řezána rychlostí  $3,45 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ .

$$v_{PL4/1} = \frac{s}{t} = \frac{\frac{344,95}{60}}{1000} = 3,4495 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1} \quad (2.1.2)$$

Jednotka  $s$  je celková délka první oblasti (tab. 2.1), jednotka  $t$  je čas, který je v tabulce příloha č. 3.

Sečtou se všechny hodnoty pro tuto tloušťku a spočítá se průměr.

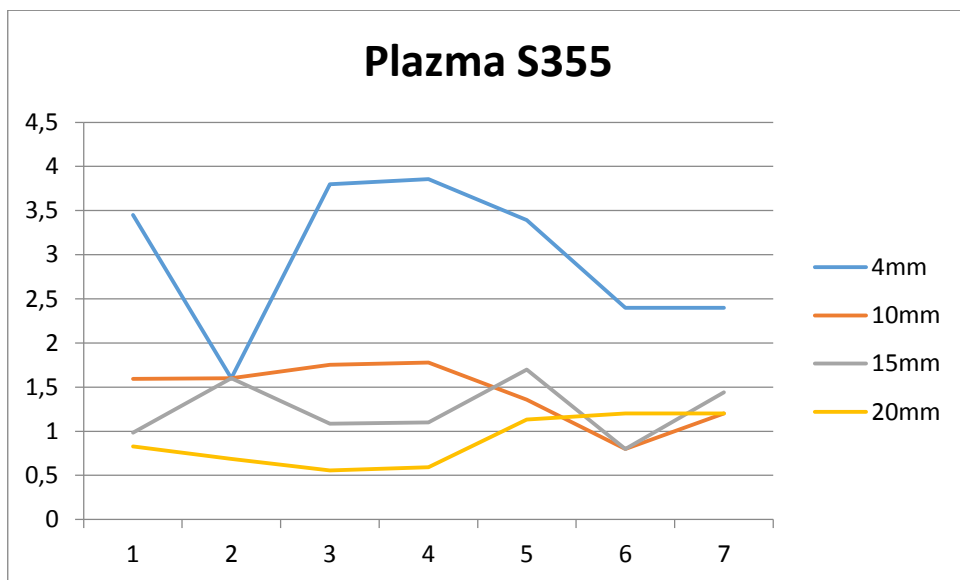
$$v_{4/celk} = \frac{\sum v_i}{7} = \frac{3,4495 + 1,6 + 3,8 + 3,856 + 3,392 + 2,4 + 2,4}{7} = 2,985 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1} \quad (2.1.3)$$

Průměrná rychlost řezání plechu tloušťky 4 mm je  $2,985 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ .

Tab. 2.2: Plazmou řezané vzorky o jakosti S355.

oblast	1	2	3	4	5	6	7	průměr
tloušťka	m/min	m/min	m/min	m/min	m/min	m/min	m/min	m/min
4mm	3,4495	1,6	3,8	3,856	3,3942	2,4	2,4	2,985671
10mm	1,59207692	1,6	1,753846	1,779692	1,35768	0,8	1,2	1,440471
15mm	0,98557143	1,6	1,085714	1,101714	1,6971	0,8	1,44	1,2443
20mm	0,82788	0,685714	0,556098	0,593231	1,1314	1,2	1,2	0,884903

Na grafu 2.1 je znázorněna řezná rychlost, která se zmenšovala v závislosti na tloušťce materiálu.



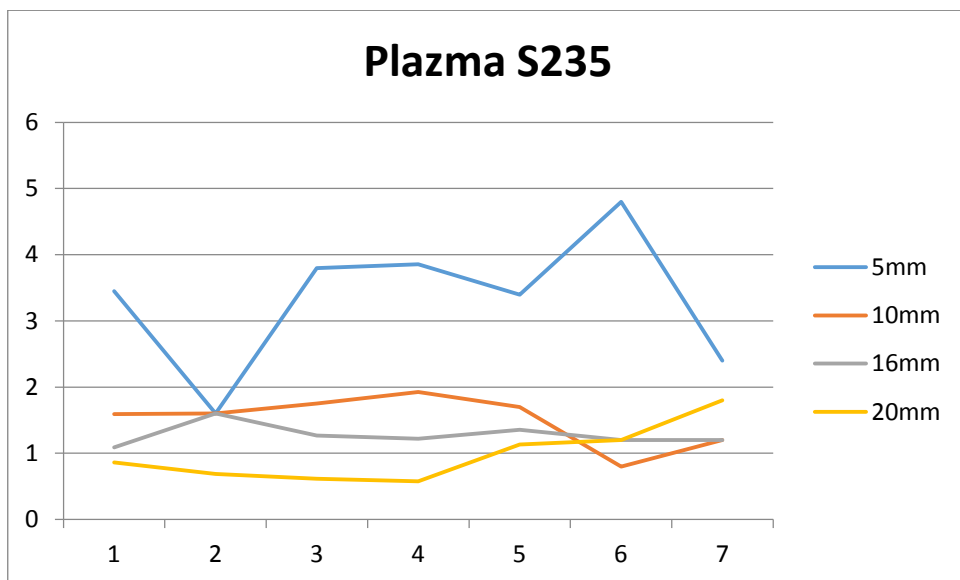
Graf 2.1: Plazmou řezané vzorky o jakosti S355.

## 2. Plazmou řezané vzorky o jakosti S235

Pro řezání plazmou jsou časy uvedeny v příloze v tabulce č. 3. V tabulce 2.3 jsou uvedeny rychlosti řezání. Hodnoty rychlosti pro přehlednost jsou zobrazeny v grafu 2.2.

Tab. 2.3: Plazmou řezané vzorky o jakosti S235.

oblast	1	2	3	4	5	6	7	průměr
tloušťka	m/min	m/min	m/min	m/min	m/min	m/min	m/min	m/min
5mm	3,4495	1,6	3,8	3,856	3,3942	4,8	2,4	3,328529
10mm	1,59207692	1,6	1,753846	1,928	1,6971	0,8	1,2	1,510146
16mm	1,08931579	1,6	1,266667	1,217684	1,35768	1,2	1,2	1,275907
20mm	0,862375	0,685714	0,616216	0,5784	1,1314	1,2	1,8	0,982015



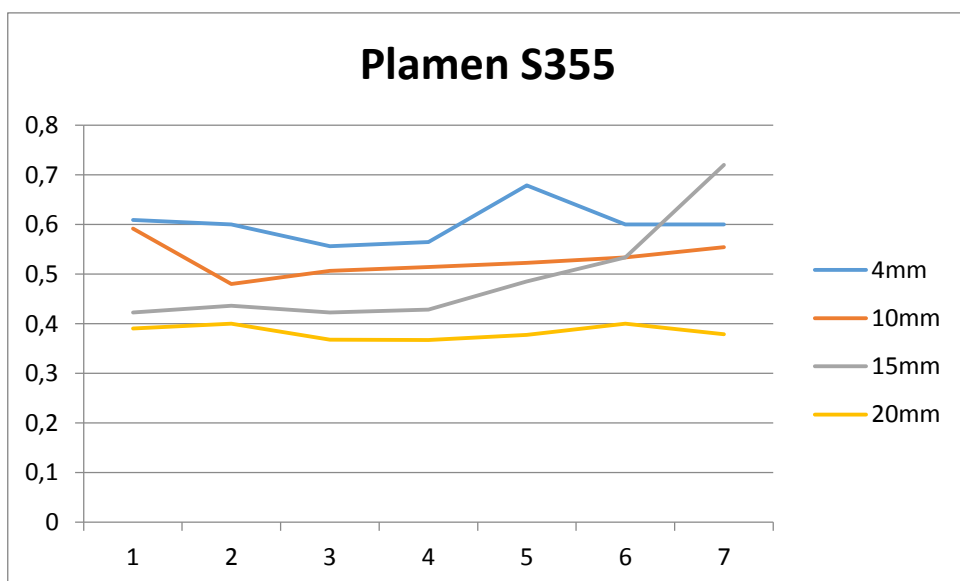
Graf 2.2: Plazmou řezané vzorky o jakosti S235.

### 3. Kyslíkem řezané vzorky o jakosti S355

Pro řezání kyslíkem jsou časy uvedeny v příloze v tabulce č. 3. V tabulce 2.4 jsou uvedeny rychlosti řezání. Hodnoty rychlosti jsou vloženy do grafu 2.3.

Tab. 2.4: Kyslíkem řezané vzorky o jakosti S355.

oblast	1	2	3	4	5	6	7	průměr
	m/min	m/min	m/min	m/min	m/min	m/min	m/min	m/min
4mm	0,608735	0,6	0,556098	0,564293	0,67884	0,6	0,6	0,601138
10mm	0,591343	0,48	0,506667	0,514133	0,522185	0,533333	0,553846	0,528787
15mm	0,422388	0,436364	0,422222	0,428444	0,484886	0,533333	0,72	0,49252
20mm	0,390509	0,4	0,367742	0,367238	0,377133	0,4	0,378947	0,383081



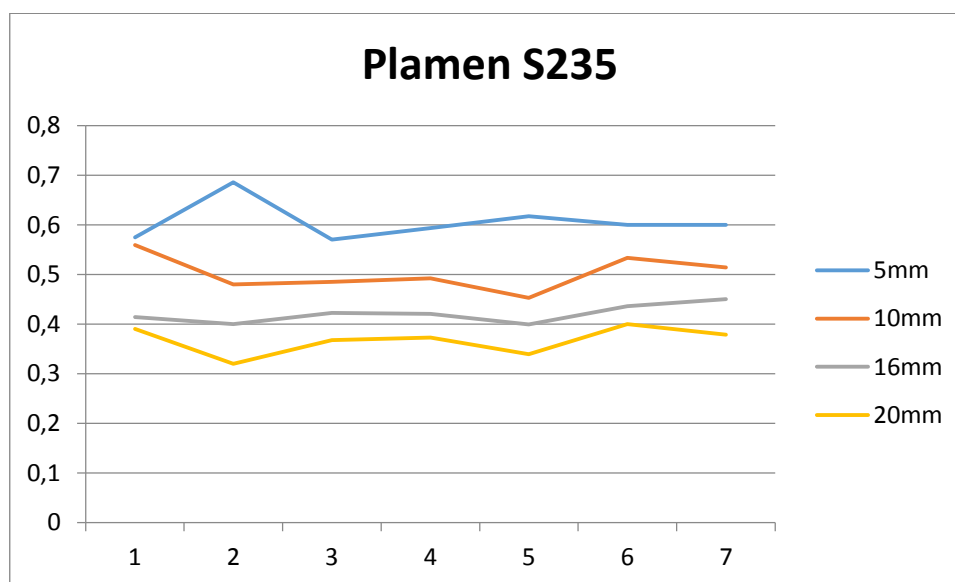
Graf 2.3: Kyslíkem řezané vzorky o jakosti S355.

#### 4. Kyslíkem řezané vzorky o jakosti S235

Pro řezání kyslíkem jsou časy uvedeny v příloze v tabulce č. 3. V tabulce 2.5 jsou uvedeny rychlosti řezání. Hodnoty rychlosti jsou vloženy do grafu 2.4.

Tab. 2.5: Kyslíkem řezané vzorky o jakosti S235

oblast	1	2	3	4	5	6	7	průměr
	m/min	m/min	m/min	m/min	m/min	m/min	m/min	m/min
5mm	0,574917	0,685714	0,57	0,593231	0,617127	0,6	0,6	0,605856
10mm	0,559378	0,48	0,485106	0,492255	0,45256	0,533333	0,514286	0,502417
16mm	0,41394	0,4	0,422222	0,420655	0,399318	0,436364	0,45	0,420357
20mm	0,390509	0,32	0,367742	0,373161	0,33942	0,4	0,378947	0,367111



Graf 2.4: Kyslíkem řezané vzorky o jakosti S235

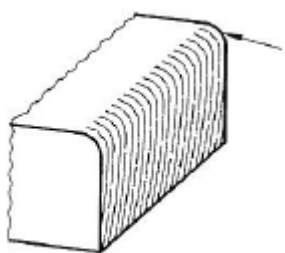
## 2.2 Vizuální kontrola

Vizuální kontrola byla provedena z důvodu ověření kvality řezání. Byly změřeny největší rozměry (výška, šířka) a následně se provedla kontrola vad dle normy na klasifikaci vad ČSN EN ISO 17658. Všechny nalezené vady jsou popsány a zdokumentovány níže.

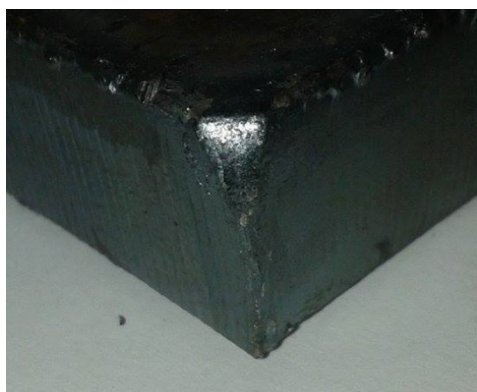
### 4.1.1

Zaoblení hrany řezu

Výraznější zaoblení řezné hrany, která může být na horní nebo dolní hraně řezu [8].



Obr.2.6.1: Zaoblení horní hrany řezu [8].

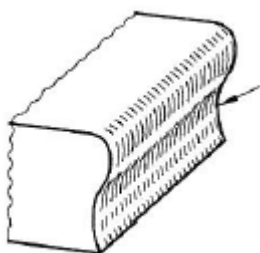


Obr.2.6.2: Fotka vady 4.1.1.

### 4.2.1.5

Nepravidelný profil řezu

Vlnitý řez ve směru tloušťky řezu [8].



Obr. 2.7.1: Nepravidelný profil řezu [8].



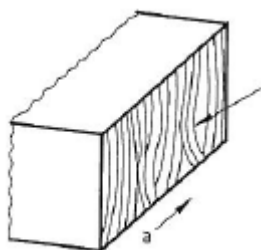


Obr. 2.7.2: Fotka vady 4.2.1.5.

### 4.2.2.3

Místní odchylka

Zdůrazněná nesrovnalost v nebo proti směru [8].



Obr. 2.8.1: Místní odchylka [8].



Obr. 2.8.2: Fotka vady 4.2.2.3 detail 1.

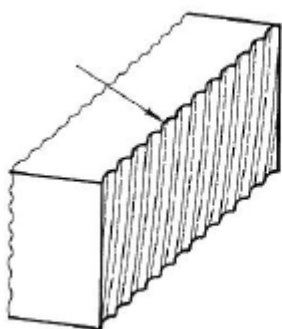


Obr. 2.8.3: Fotka vady 4.2.2.3 detail 2.

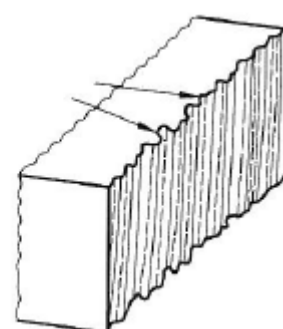
#### 4.2.2.5

Nepravidelná hloubková nerovnost

Nepřijatelné nerovnosti do hloubky [8].



Obr. 2.9.1: Nadměrná hloubka [8].



Obr. 2.9.2: Nepravidelná hloubka [8].

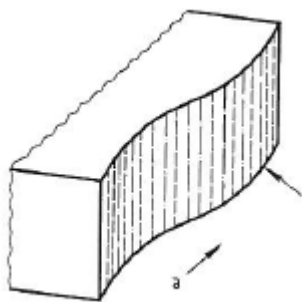


Obr. 2.9.3: Fotka vady 4.2.2.5.

#### 4.2.5

##### Nerovný řez

Čelní řez je charakterizován zvlněním ve směru řezu [8].



Obr. 2.10.1: Nerovný řez [8].

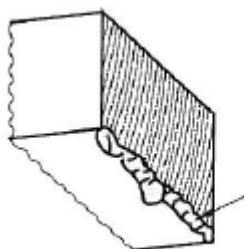


Obr. 2.10.2: Fotka vady 4.2.5.

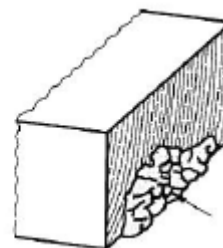
#### 4.3

##### Přilnavá struska

Struska, která je obtížně odstranitelná, zejména struska, která přilne ke spodní hraně řezu, převážně v dolní oblasti [8].



Obr. 2.11.1: Ulpělá struska na spodní hraně [8].



Obr. 2.11.2: Skvrna strusky na řezu [8].



Obr. 2.11.3: Fotka vady 4.3.

Při vizuální kontrole byly zároveň změřeny největší rozměry označené (a, b). Rozměr označený písmenem „a“ označuje výšku vzorku. Rozměr označený písmenem „b“ je šířka vzorku. Všechny tyto hodnoty jsou uvedeny v mm. Rozměry byly získány posuvným měřidlem.

Závěrečné shrnutí všech výsledků měření a vyhodnocení vad je uvedeno v tabulkách 2.6 – 2.9.

Tab. 2.6: Vizuální kontrola vzorku o jakosti S355 řezaného plazmou.

Plazma tl. 4	a	b	VT	4.2.2.3	4.2.5
Rozměr [mm]	379,8	239,92			
Plazma tl. 10	a	b	VT	4.2.1.5	4.2.5
Rozměr [mm]	380	240			
Plazma tl. 15	a	b	VT	4.2.5	
Rozměr [mm]	379,88	239,24			
Plazma tl. 20	a	b	VT	4.2.5	
Rozměr [mm]	379,64	239,6			

Tab. 2.7: Vizuální kontrola vzorku o jakosti S235 řezaného plazmou.

Plazma tl. 5	a	b	VT	4.2.5	4.2.2.3
Rozměr [mm]	380	23,82			
Plazma tl. 10	a	b	VT	4.2.2.3	
Rozměr [mm]	380	240			
Plazma tl. 16	a	b	VT	4.2.5	
Rozměr [mm]	379,74	240			
Plazma tl. 20	a	b	VT	4.2.5	
Rozměr [mm]	379,4	238,98			

Tab. 2.8: Vizuální kontrola vzorku o jakosti S355 řezaného kyslíkem.

Kyslík tl. 4	a	b	VT	4.2.2.5	4.3
Rozměr [mm]	179,74	238,9			
Kyslík tl. 10	a	b	VT	4.2.2.5	
Rozměr [mm]	380	239,52			
Kyslík tl. 15	a	b	VT	4.2.2.5	4.3
Rozměr [mm]	380,52	239,64			
Kyslík tl. 20	a	b	VT	4.3	
Rozměr [mm]	379,5	239,42			

Tab. 2.9: Vizuální kontrola vzorku o jakosti S235 řezaného kyslíkem.

Kyslík tl. 5	a	b	VT	4.1.1	4.3
Rozměr [mm]	379,38	238,88			
Kyslík tl. 10	a	b	VT	4.2.2.5	4.3
Rozměr [mm]	379,22	240			
Kyslík tl. 15	a	b	VT	4.1.1	
Rozměr [mm]	379,5	240,86			
Kyslík tl. 20	a	b	VT	4.1.1	
Rozměr [mm]	379,22	239,02			

Plazma je o něco přesnější v zachování přesných rozměrů oproti kyslíku. Vady na vzorcích jak pro plazmu, tak pro kyslík je třeba prokonzultovat z hlediska funkčnosti konstrukce.

## 2.3 Měření drsnosti

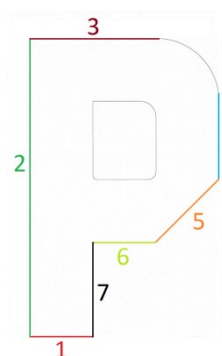
Měření drsnosti bylo provedeno na přístroji Mitutoyo SJ-301. Tento přístroj je složen z hlavní centrály, ve které se zadávají data a následně se vyhodnocují a k ní spojené kabelem měřidlo získávající tyto hodnoty Ra a Rz5.

S hodnotami Ra se bude počítat v této části 2.3 praktické práce. Hodnoty Rz5 budou použity pro vyhodnocení průměrné výšky prvků profilu v závěru praktické části 2.5.

Ra - střední aritmetická úchylka profilu;

Rz5 - výška nerovnosti profilu určená z 5 bodů.

Z důvodu omezení měřidla byly změřeny jen vnější rozměry a rovinné plochy vzorku. Proto byl vzorek označen novým očíslováním oblastí. Očíslování jednotlivých oblastí měření je znázorněno na obrázku 2.12.



Obr. 2.12: Rozdělení oblastí při měření drsnosti.

Každá plocha byla změřena 5krát a spočten průměr. Například v tabulce 2.10 je naměřených 5 hodnot na vzorku řezaném plazmou materiálu S355 tloušťky 4mm pro 1. oblast. Ve vzorci 2.3.1 je spočten průměr naměřených hodnot.

Tab. 2.10: Naměřené hodnoty pro vzorek řezaný plazmou materiál S355 tloušťky 4mm.

Plazma tl. 4	1. oblast
Ra	2,87
Ra	3,01
Ra	2,53
Ra	2,74
Ra	1,87

$$X_{Ra4/1} = \frac{1}{n} \cdot \sum x_i = \frac{1}{5} \cdot 13,02 = 2,604 \mu\text{m} \quad (2.3.1)$$

### Výběrová směrodatná odchylka

$$S(x)_{Ra4/1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0,446 \mu m \quad (2.3.2)$$

$$S(\bar{x})_{Ra4/1} = \frac{S(x)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}} = 0,199 \mu m \quad (2.3.3)$$

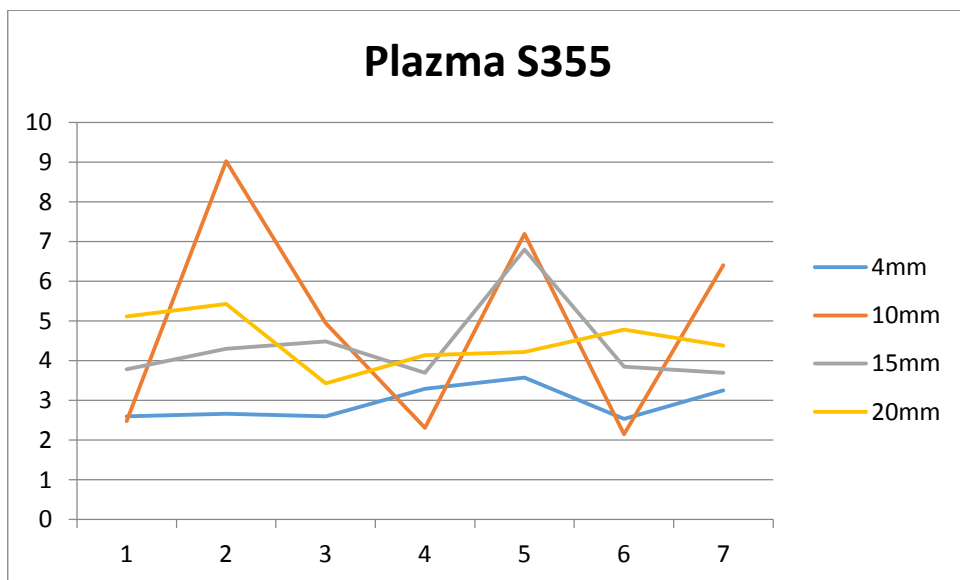
Koeficient  $k = 2,776$

$$U_{Ra4/1} = S(x) \cdot k = 0,554 \mu m \quad (2.3.4)$$

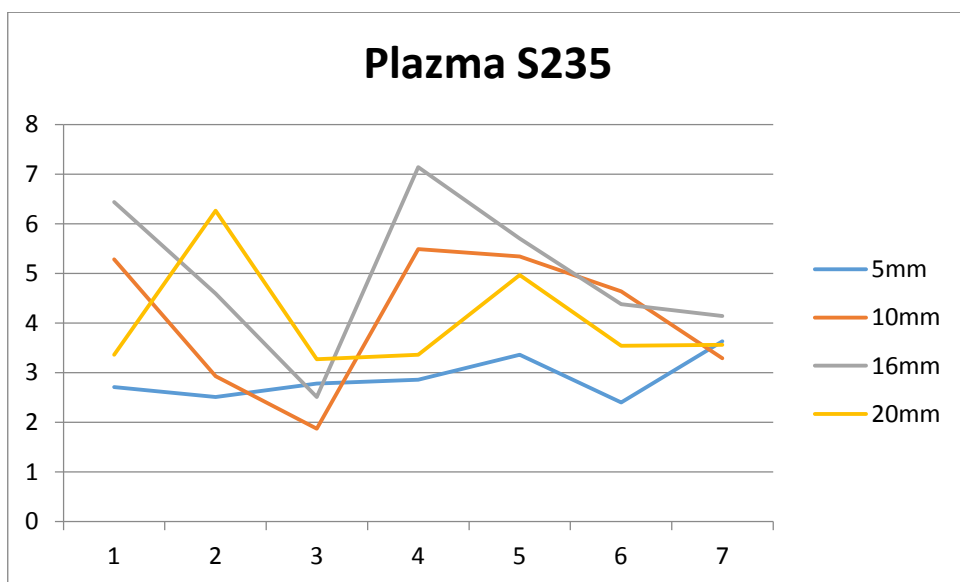
### Výsledek

$$x_{Ra4/1} = (2,60 \pm 0,55) \mu m \quad k = 2,776 \quad (2.3.5)$$

Výsledek je zapsán v tabulce příloha č. 4. Všechny výsledky jsou zapsány v tabulkách v příloze č. 4. Hodnoty jsou zobrazeny do grafů 2.5, 2.6, 2.7 a 2.8

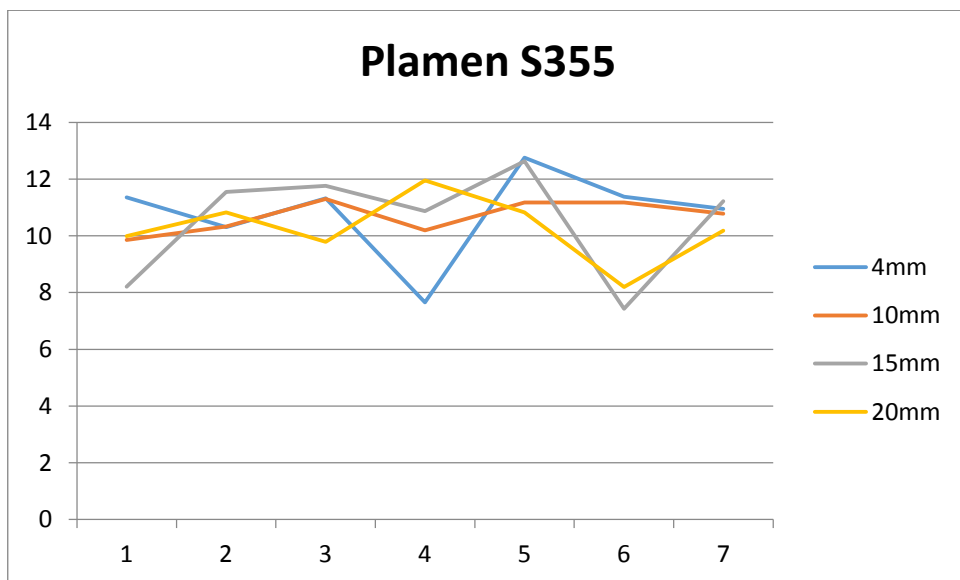


Graf 2.5: Měření drsnosti vzorku řezaného plazmou materiálu S355.

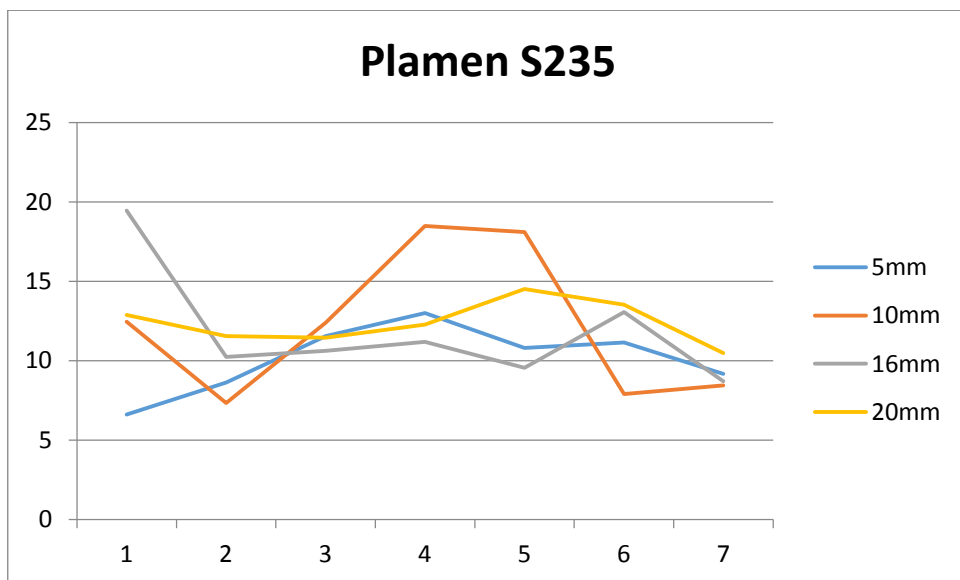


Graf 2.6: Měření drsnosti vzorku řezaného plazmou materiálu S235.





Graf 2.7: Měření drsnosti vzorku řezaného kyslíkem materiálu S355.

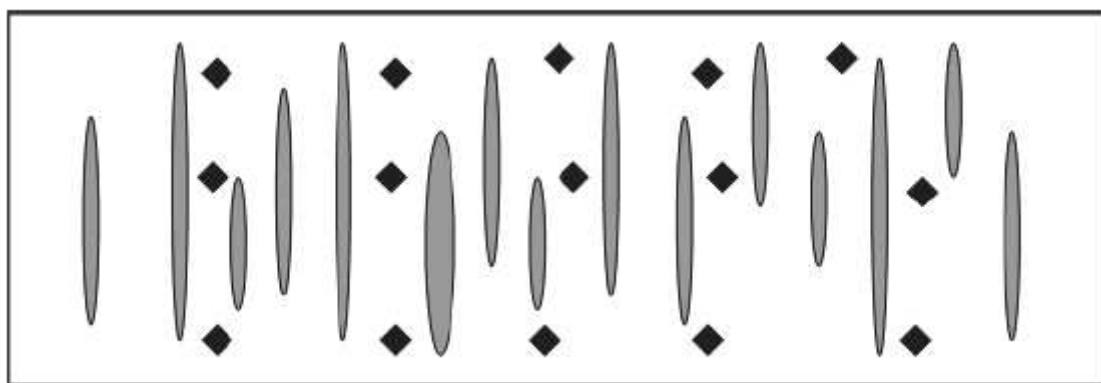


Graf 2.8: Měření drsnosti vzorku řezaného kyslíkem materiálu S235.

U vzorků řezaných plazmou je menší drsnost než u řezaných kyslíkem. Pokud se vezmou do úvahy následné technologické operace a drsnost povrchu by mohla mít vliv na funkčnost konstrukce, kyslíkem řezané plechy je nutno opravit.

## 2.4 Měření tvrdosti

Zkouška tvrdosti na tepelně řezaných hranách musí být provedena v souladu s ČSN EN ISO 6507-1. Zkušební vzorky pro měření tvrdosti musí mít rovinné a rovnoběžné kontaktní plochy. Broušení řezané hrany musí být provedeno brusným elementem se zrnitostí 600. Základ povrchu musí být upraven tak, aby některé zářezy byly viditelné. Měření tvrdosti musí být v oblasti blízko horní a dolní hrany a také ve středu tloušťky vzorku viz obr. 2.13 [7].



Obr. 2.13: Měřicí místa na řezné ploše [7].

Z 16ti vzorků bylo vybráno 8 vzorků, které byly rozřezány pásovou pilou. Vzorky se rozdělily na 4 plazmou řezané a 4 kyslíkem řezané. U všech 8 vzorků se jedná o ocel S355. Označení se skládá z písmen a čísla. Písmena “PL a OXY” označují použitou metodu řezání v tomto případě plazma a kyslík a číslo označuje tloušťku vzorku. Označení těchto vzorků je uvedeno v tabulce 2.11.

Tab 2.11: Označení vzorků.

Plazma	Plamen
PL4	OXY4
PL10	OXY10
PL15	OXY15
PL20	OXY20

Vzorek byl poté označen oblastí rozdělení pro zkoušku makrostruktury. Na ploše řezané menší rychlostí byla provedena zkouška tvrdosti.

Poznámka: Označení pro kontrolu makrostruktury musí být umístěno tak, aby z každé strany byla oblast minimálně 20 mm.

V závislosti na tloušťce vzorku musí být provedeno měření tvrdosti (viz tab. 2.12). Následně při zkoušce tvrdosti musí být dodržena vzdálenost v souladu s EN ISO 6507-1.

Tab.2.12: Počet a oblast měření tvrdosti [7].

Tloušťka [mm]	Měření tvrdosti
$t \leq 5$	5 vpichů v polovině tloušťky
$t > 5$	5 vpichů blízko horní hrany 5 vpichů v polovině tloušťky 5 vpichů blízko dolní hrany

Všechny hodnoty měření byly napsány do tabulek viz. příloha č. 5. Pro srovnání hodnot tvrdosti byly 3 vpichy do základního materiálu. Poté vpichy do pálené hrany. Vždy se jedná o dvě hodnoty (pro dvě úhlopříčky).

Na obrázku 2.14 jsou znázorněny řezné plochy, na kterých jsou vidět vpichy po zkoušce tvrdosti.



Obr. 2.14: Vpichy na řezných plochách po zkouškách tvrdosti.

Měření bylo provedeno za pomoci přístroje WPM Werkstoffprüfsysteme Leipzig GmbH viz obr. 2.15.



Obr. 2.15: Tvrdoměr.

V tabulkách 2.14 – 2.21 jsou uvedeny vypočtené hodnoty tvrdostí a následně v grafech 2.9 - 2.16 jsou zobrazeny výsledné hodnoty měření pro jednotlivé vzorky. Dle normy ČSN EN 1090-2 je provedeno vyhodnocení tvrdosti.

### Tvrdot povrchů volných hran

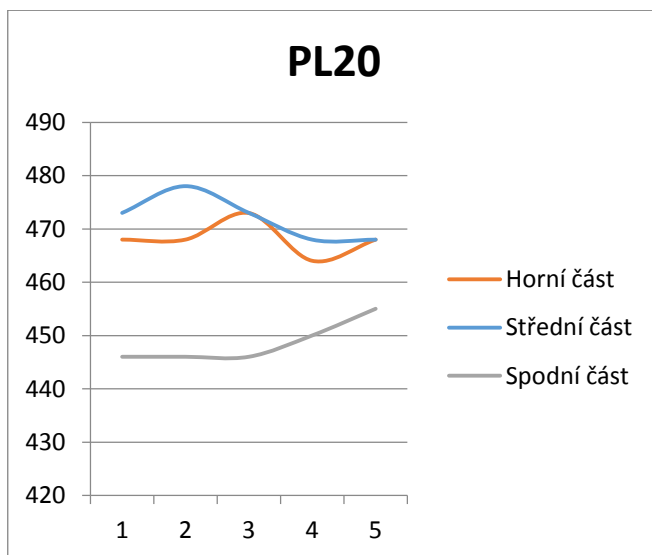
Pro konstrukční oceli, musí být tvrdost povrchů volných hran v souladu s tabulkou 2.13. V tomto případě se musí kontrolovat způsobnost procesů, které vedou k místní tvrdosti (tepelné dělení, děrování). Aby se dosáhla požadovaná tvrdost povrchů volných hran, musí se materiál, pokud je třeba předežhřát [7].

Tab. 2.13: Dovolené maximální hodnoty tvrdosti (HV 10) [7].

Normy výrobků	Pevnostní třída oceli	Hodnoty tvrdosti
EN 10025 -2 až -5	S235 až S355	380
EN 10210-1, EN 10219-1		

Tab. 2.14: Výsledné hodnoty tvrdostí pro vzorek PL20.

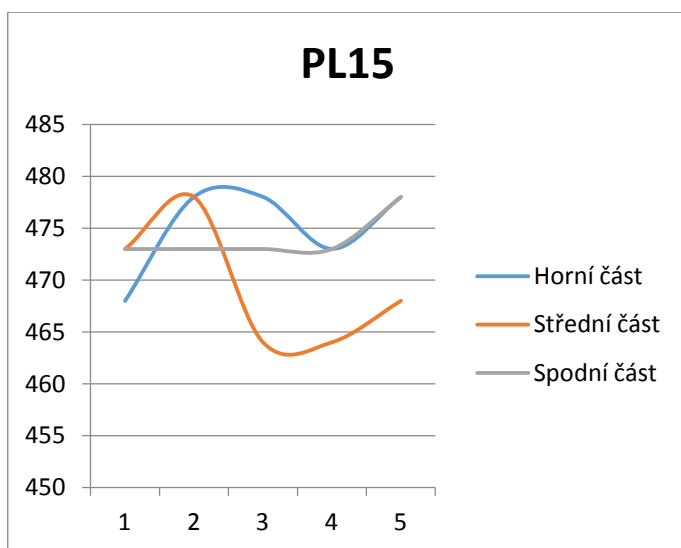
PL20	Základní materiál	165	164	164			HV
	Horní část	468	468	473	464	468	HV
	Střední část	473	478	473	468	468	HV
	Spodní část	446	446	446	450	455	HV



Graf 2.9: Měření tvrdostí na vzorku PL20.

Tab. 2.15: Výsledné hodnoty tvrdostí pro vzorek PL15.

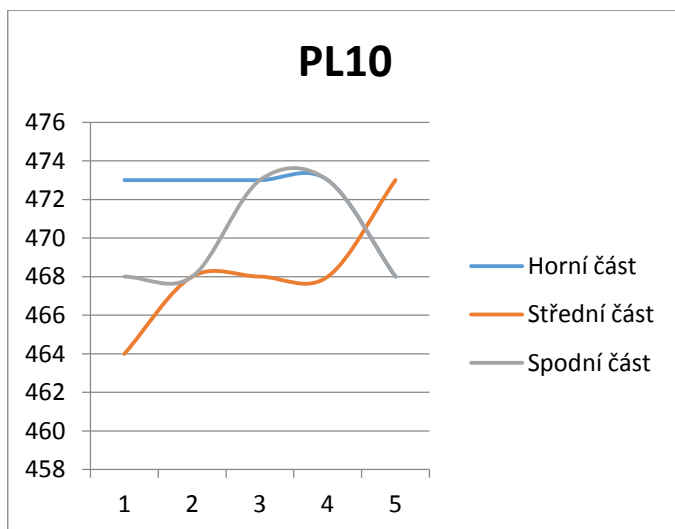
PL15	Základ materiál	164	163	163			HV
	Horní část	468	478	478	473	478	HV
	Střední část	473	478	464	464	468	HV
	Spodní část	473	473	473	473	478	HV



Graf 2.10: Měření tvrdostí na vzorku PL15.

Tab. 2.16: Výsledné hodnoty tvrdostí pro vzorek PL10.

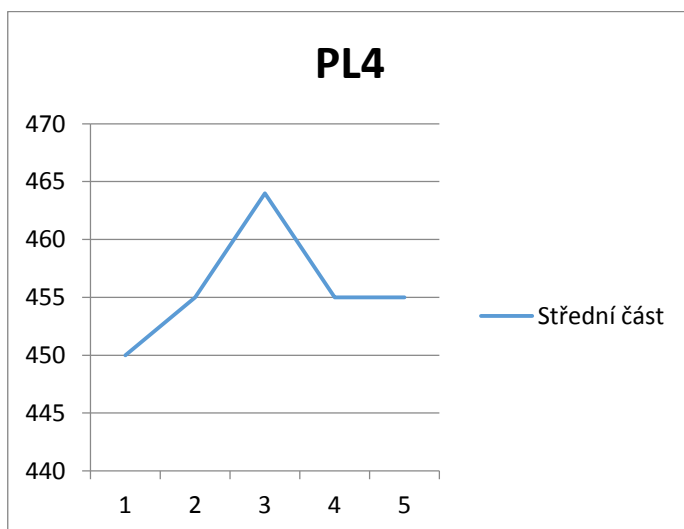
PL10	Základ	160	160	160			HV
	Horní část	473	473	473	473	468	HV
	Střední část	464	468	468	468	473	HV
	Spodní část	468	468	473	473	468	HV



Graf 2.11: Měření tvrdostí na vzorku PL10.

Tab. 2.17: Výsledné hodnoty tvrdostí pro vzorek PL4.

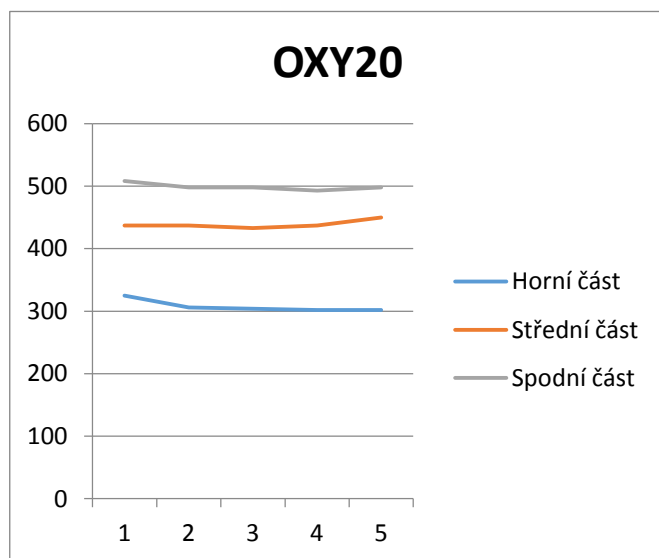
PL4	Základ	156	154	155			HV
	Střední část	450	455	464	455	455	HV



Graf 2.12: Měření tvrdostí na vzorku PL4.

Tab. 2.18: Výsledné hodnoty tvrdostí pro vzorek OXY20.

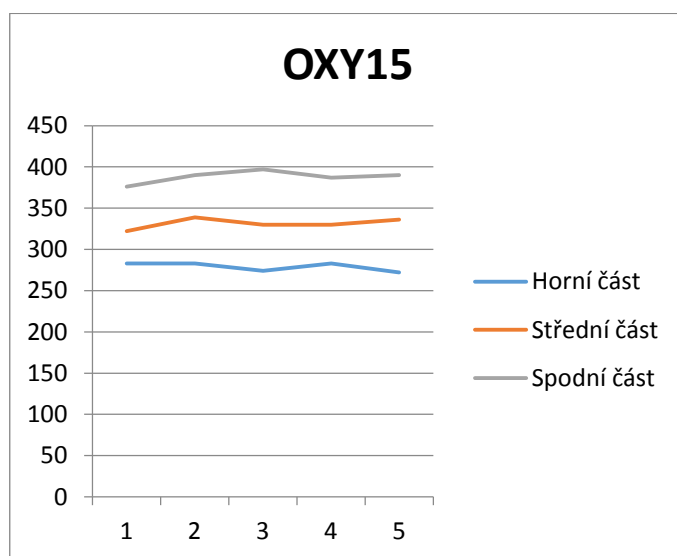
OXY20	Základ	158	160	160			HV
	Horní část	325	306	304	302	302	HV
	Střední část	437	437	433	437	450	HV
	Spodní část	508	498	498	493	498	HV



Graf 2.13: Měření tvrdostí na vzorku OXY20.

Tab. 2.19: Výsledné hodnoty tvrdostí pro vzorek OXY15.

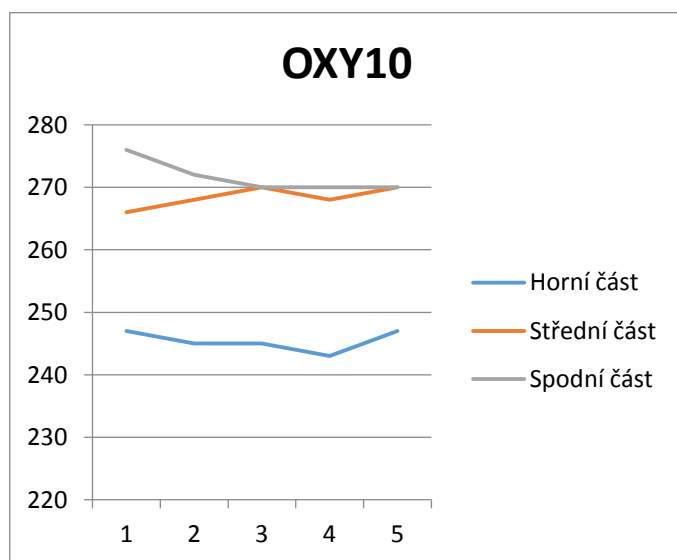
OXY15	Základ	165	167	164			HV
	Horní část	283	283	274	283	272	HV
	Střední část	322	339	330	330	336	HV
	Spodní část	376	390	397	387	390	HV



Graf 2.14: Měření tvrdostí na vzorku OXY15.

Tab. 2.20: Výsledné hodnoty tvrdostí pro vzorek OXY10.

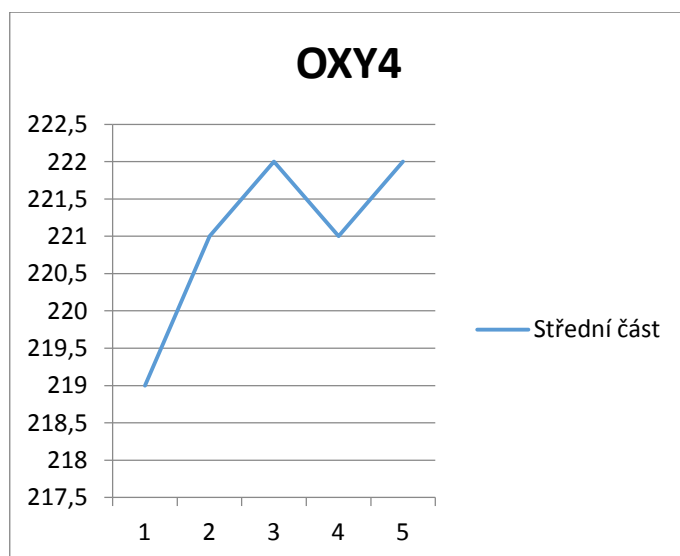
OXY10	Základ	160	160	159			HV
	Horní část	247	245	245	243	247	HV
	Střední část	266	268	270	268	270	HV
	Spodní část	276	272	270	270	270	HV



Graf 2.15: Měření tvrdostí na vzorku OXY10.

Tab. 2.21: Výsledné hodnoty tvrdostí pro vzorek OXY4.

OXY4	Základ	158	159	160			HV
	Střední část	219	221	222	221	222	HV



Graf 2.16: Měření tvrdostí na vzorku OXY4.



Dle normy ČSN EN 1090-2. Plazmou řezané vzorky touto zkouškou neprošly. Kyslíkem řezané vzorky v této zkoušce uspěly a pro přesnost jsou uvedeny v tabulce 2.22.

Tab. 2.22: Pozitivní výsledky zkoušky tvrdostí.

Vzorek	Zkoušená oblast
OXY20	Horní část
OXY15	Horní část
	Střední část
OXY10	Horní část
	Střední část
	Dolní část
OXY4	Střední část

## 2.5 Makrostruktura

Makrostruktura byla provedena pro ověření úchylky kolmosti a průměrné výšky prvků profilu Rz5. Vyhodnocení úchylky kolmosti bylo provedeno za pomoci programu Quick PHOTO CAMERA 3.0 (firma Promicra).

V prvním kroku bylo provedeno dělení vzorku na stroji Struers Discotomb diamantovým kotoučem pod vodou (vodní chlazení). Dělení vzorku je uvedeno na obrázku 2.16.



Obr. 2.16: Dělení vzorku.

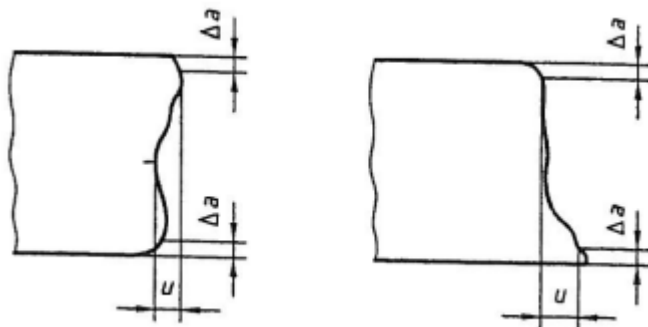
Další operací bylo ruční broušení za pomoci smirkového plátna o zrnitosti 220, 320 a nakonec 400.

Poslední operací bylo provedeno leptání 10% vodním roztokem kyseliny dusičné ( $\text{HNO}_3$ ) aplikované potíráním. Následně opláchnutí vodou, lihem a osušení vzduchem

### Úchylka úhlu $u$ (L3)

Vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými přímkami (dotýkajícími se řezného povrchu), mezi které je vepsán profil povrchu řezu. Přímký svírají s povrchem řezaného materiálu určený úhel (tj.  $90^\circ$  v případě svislých řezů) [1].

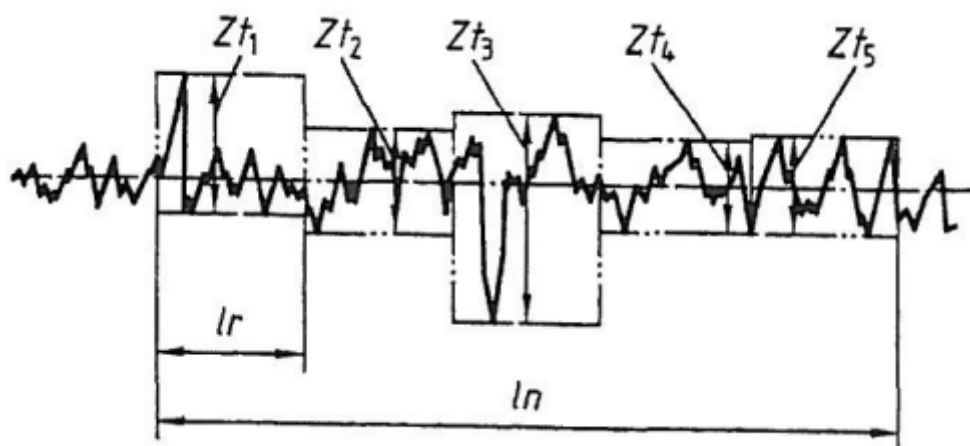
Poznámka: Úchylka kolmosti nebo pravouhlosti zahrnuje nejen úchytky kolmosti, ale také úchytky rovinnosti. Obrázek 2.17 ukazuje maximální skutečné úchytky v rámci toleranční třídy [1].



Obr. 2.17: Svislý řez [1].

### Průměrná výška prvků profilu, $Rz5$

Aritmetický průměr z jednotlivých výšek prvků profilu na pěti za sebou následujících základních délkách – viz obrázek 2.18 [1].



Obr. 2.18: Průměrná výška prvků profilu [1].

Poznámka: Index 5 do  $Rz5$  byl přidán proto, aby se odlišila průměrná výška profilu a největší výška profilu z pěti jednotlivých prvků profilu [1].

kde:

Zt1 až Zt5 charakterizuje jednotlivé prvky profilu;

$l_n$  je celková vyhodnocovací délka;

$l_r$  je základní délka ( $1/5$  z  $l_n$ ) [1].

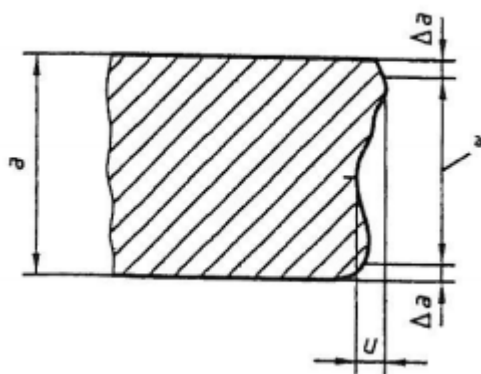
Umístění měřících míst

Charakteristická hodnota úchylky kolmosti nebo úhlové úchylky,  $u$  (L3), se určuje pouze v omezené oblasti povrchu řezu. Oblast se musí zmenšit o vzdálenost  $\Delta a$  od horní a dolní hrany řezu (viz. obrázek 2.19) podle tabulky 2.23.

Důvody pro zmenšení povrchu řezu je dovolené natavení horní hrany řezu [1].

Tab. 2.23: Velikost,  $\Delta a$  [1].

Tloušťka řezu $a$ mm	$\Delta a$ mm
$\leq 3$	$0,1 a$
$> 3 \leq 6$	0,3
$> 6 \leq 10$	0,6
$> 10 \leq 20$	1
$> 20 \leq 40$	1,5
$> 40 \leq 100$	2
$> 100 \leq 150$	3
$> 150 \leq 200$	5
$> 200 \leq 250$	8
$> 250 \leq 300$	10



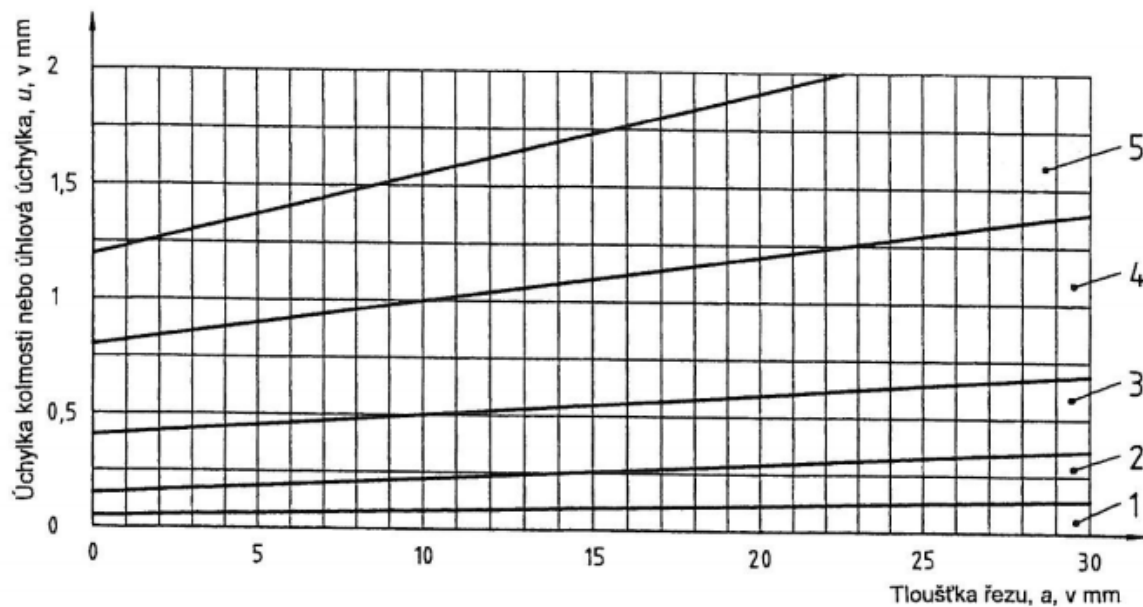
Obr. 2.19: Svislý řez [1].

Úchylka kolmosti nebo úhlová úchylka,  $u$

Toleranční pole pro úchylku kolmosti nebo úhlovou úchylku  $u$  jsou uvedena v tabulce 2.24 a na obrázku 2.20 [1].

Tab. 2.24: Úchylka kolmosti nebo úhlová úchylka,  $u$  [1].

Toleranční pole	úchylka kolmosti nebo úhlová úchylka, $u$ mm
1	$0,05 + 0,003a$
2	$0,15 + 0,007a$
3	$0,4 + 0,01a$
4	$0,8 + 0,02a$
5	$1,2 + 0,035a$



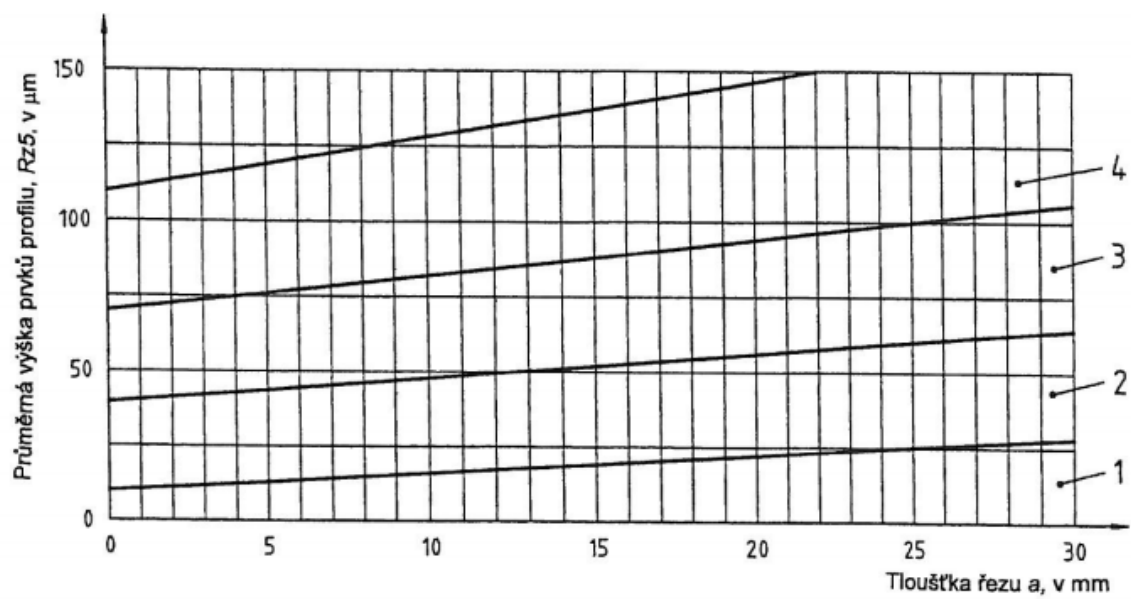
Obr. 2.20: Úchylka kolmosti,  $u$  – tloušťka zpracovaného vzorku do 30 mm [1].

#### Průměrná výška profilu, $Rz5$

Toleranční pole pro průměrnou výšku prvků profilu,  $Rz5$ , jsou uvedena v tabulce 2.25 a na obrázku 2.21 [1].

Tab. 2.25: Průměrná výška prvků profilu,  $Rz5$  [1].

Toleranční pole	Průměrná výška prvků profilu, $Rz5$ $\mu\text{m}$
1	$10 + (0,6a \text{ mm})$
2	$40 + (0,8a \text{ mm})$
3	$70 + (1,2a \text{ mm})$
4	$110 + (1,8a \text{ mm})$



Obr. 2.21: Průměrná výška prvků profilu,  $Rz5$  – tloušťka zpracovaného vzorku do 30 mm [1].

## Úchylka kolmosti

Tab. 2.26: Toleranční pole úchylky kolmosti pro vzorek PL4 strana A.

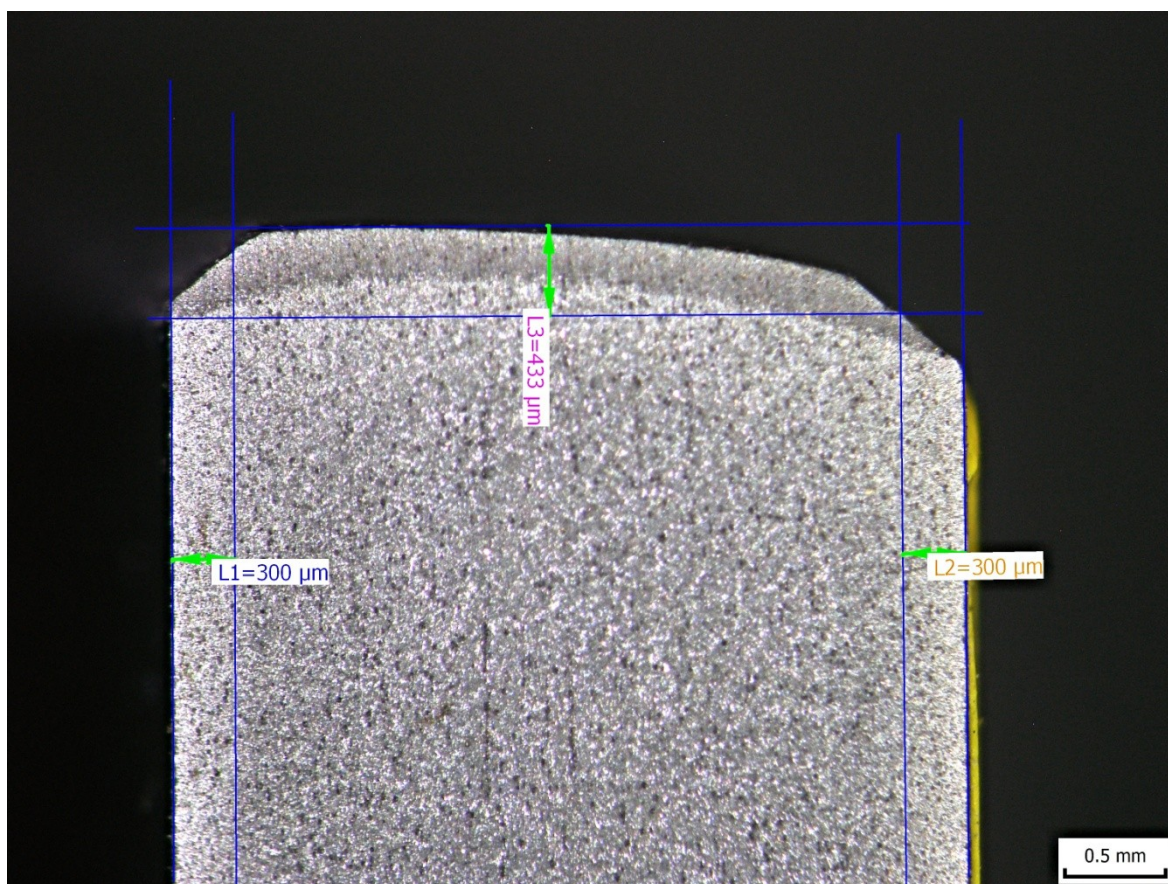
PL4, A	u = 433 μm	Tol. Pole 3
--------	------------	-------------

## Průměrná výška prvků profilu Rz5

Tab. 2.27: Toleranční pole průměrné výšky prvků profilu pro vzorek PL4 strana A.

Měření		Průměr	Toleranční pole
1.	15,37	15,904	<b>1</b>
2.	16,02		
3.	17,3		
4.	15,21		
5.	15,62		
Součet	79,52		

$$Rz5 = \frac{79,52}{5} = 15,904 \quad (2.5.1)$$



Obr. 2.22: Vzorek PL4 strana A.



## Úchylka kolmosti

Tab. 2.28: Toleranční pole úchylky kolmosti pro vzorek PL4 strana B.

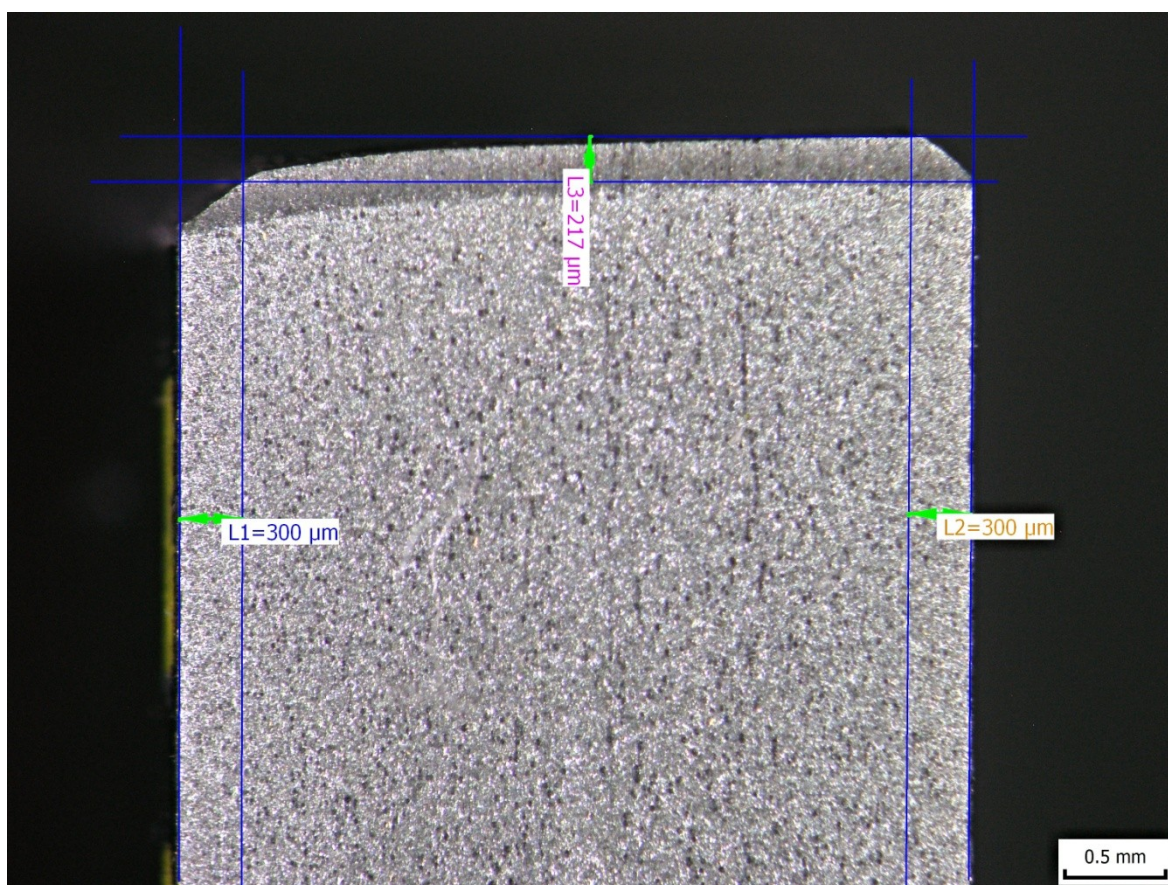
PL4, B	u = 217 μm	Tol. pole 2
--------	------------	-------------

## Průměrná výška prvků profilu Rz5

Tab. 2.29: Toleranční pole průměrné výšky prvků profilu pro vzorek PL4 strana B.

Měření		Průměr	Toleranční pole
1.	17,36	16,606	<b>1</b>
2.	16,53		
3.	15,31		
4.	16,81		
5.	17,02		
Součet	83,03		

$$Rz5 = \frac{83,03}{5} = 16,606 \quad (2.5.2)$$



Obr. 2.23: Vzorek PL4 strana B.

## Úchylka kolmosti

Tab. 2.30: Toleranční pole úchylky kolmosti pro vzorek PL10 strana A.

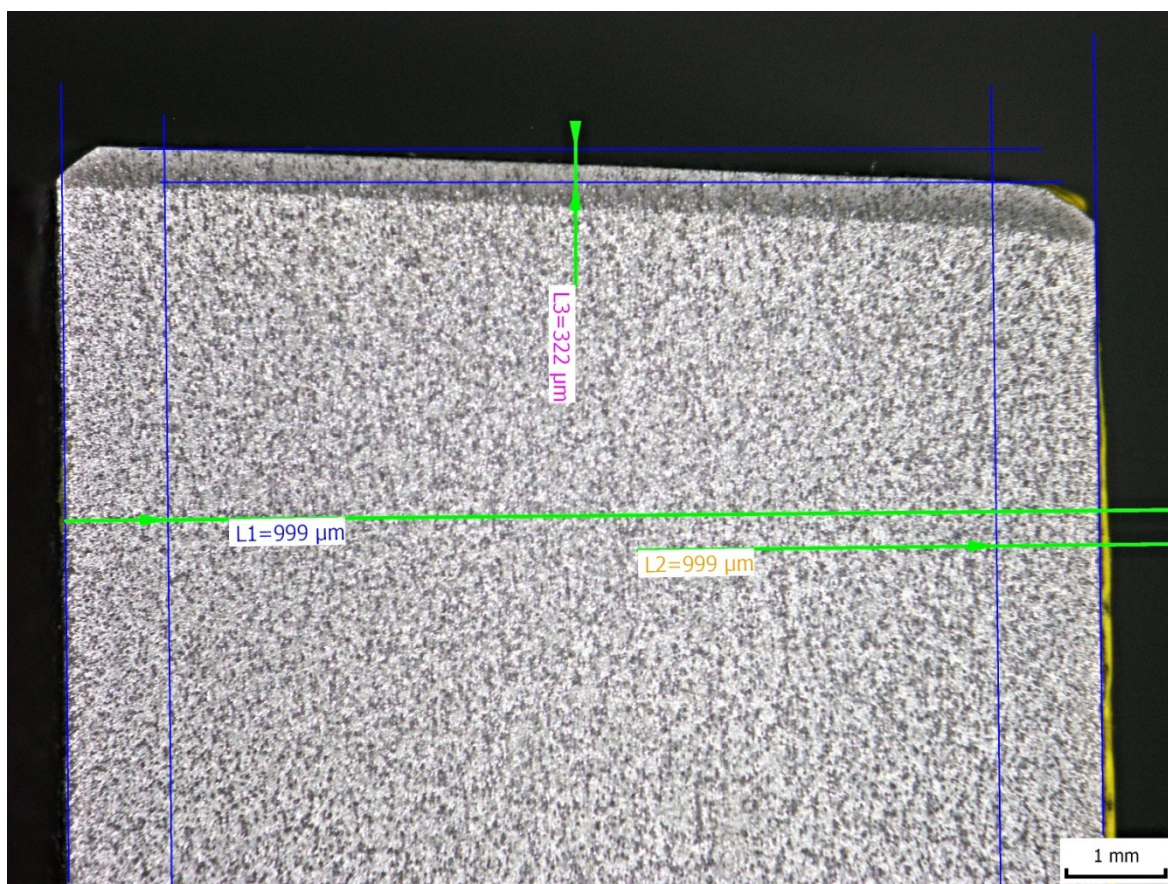
PL10, A	u = 322 μm	Tol. pole 3
---------	------------	-------------

## Průměrná výška prvků profilu Rz5

Tab. 2.31: Toleranční pole pole průměrné výšky prvků profilu pro vzorek PL10 strana A.

Měření		Průměr	Toleranční pole
1.	41,47	38,048	2
2.	42,31		
3.	37,04		
4.	45,27		
5.	24,15		
Součet	190,2		

$$Rz5 = \frac{190,24}{5} = 38,048 \quad (2.5.3)$$



Obr. 2.24: Vzorek PL10 strana A.



## Úchylka kolmosti

Tab. 2.32: Toleranční pole úchylky kolmosti pro vzorek PL10 strana B.

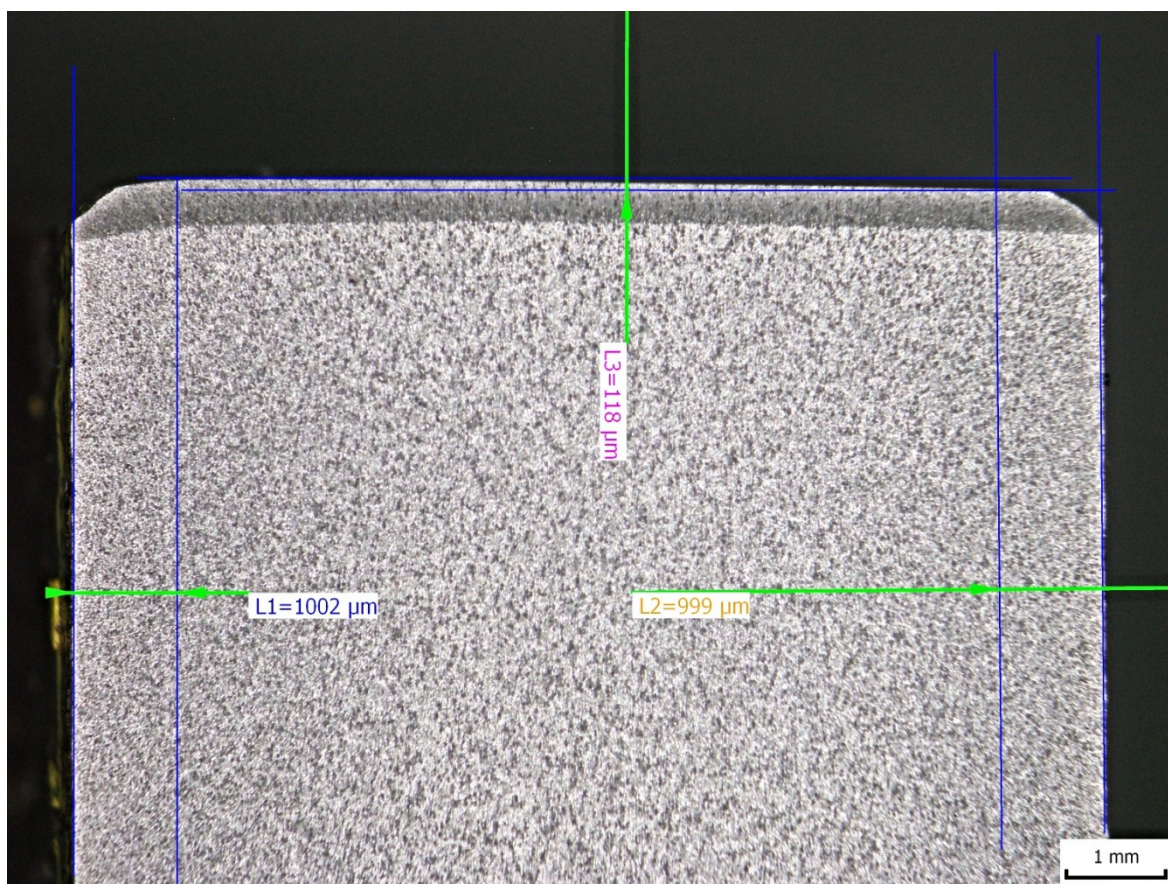
PL10, B	u = 118 µm	Tol. pole 2
---------	------------	-------------

## Průměrná výška prvků profilu Rz5

Tab. 2.33: Toleranční pole průměrné výšky prvků profilu pro vzorek PL10 strana B.

Měření		Průměr	Toleranční pole
1.	29,89	26,192	2
2.	20,88		
3.	32,89		
4.	26,73		
5.	20,57		
Součet	131		

$$Rz5 = \frac{130,96}{5} = 26,192 \quad (2.5.4)$$



Obr. 2.25: Vzorek PL10 strana B.

## Úchylka kolmosti

Tab. 2.34: Toleranční pole úchylky kolmosti pro vzorek PL15 strana A.

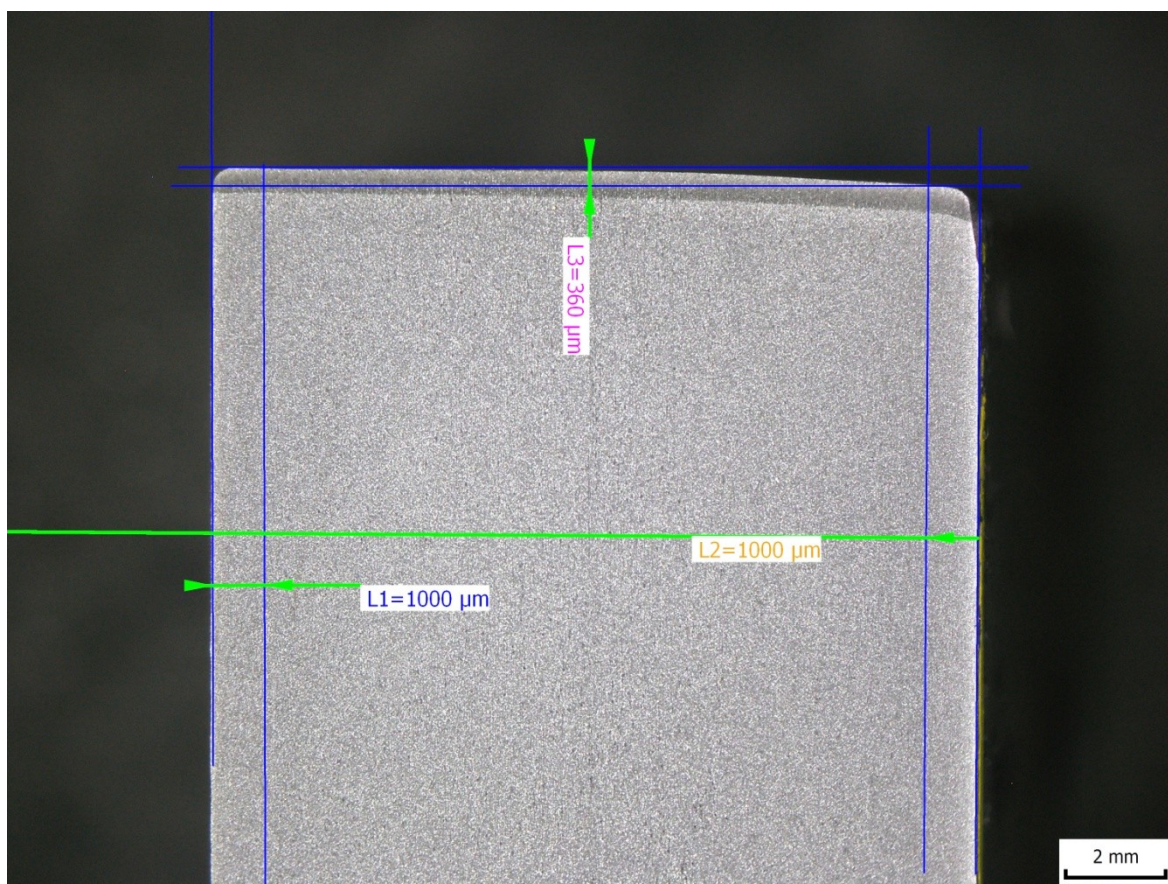
PL15, A	u = 360 μm	Tol. pole 3
---------	------------	-------------

## Průměrná výška prvků profilu Rz5

Tab. 2.35: Toleranční pole průměrné výšky prvků profilu vzorek PL15 strana A.

Měření		Průměr	Toleranční pole
1.	26,52	21,628	<b>1</b>
2.	28,67		
3.	16,08		
4.	20,12		
5.	16,75		
Součet	108,1		

$$Rz5 = \frac{108,14}{5} = 21,628 \quad (2.5.5)$$



Obr. 2.26: Vzorek PL15 strana A.



## Úchylka kolmosti

Tab. 2.36: Toleranční pole úchylky kolmosti pro vzorek PL15 strana B.

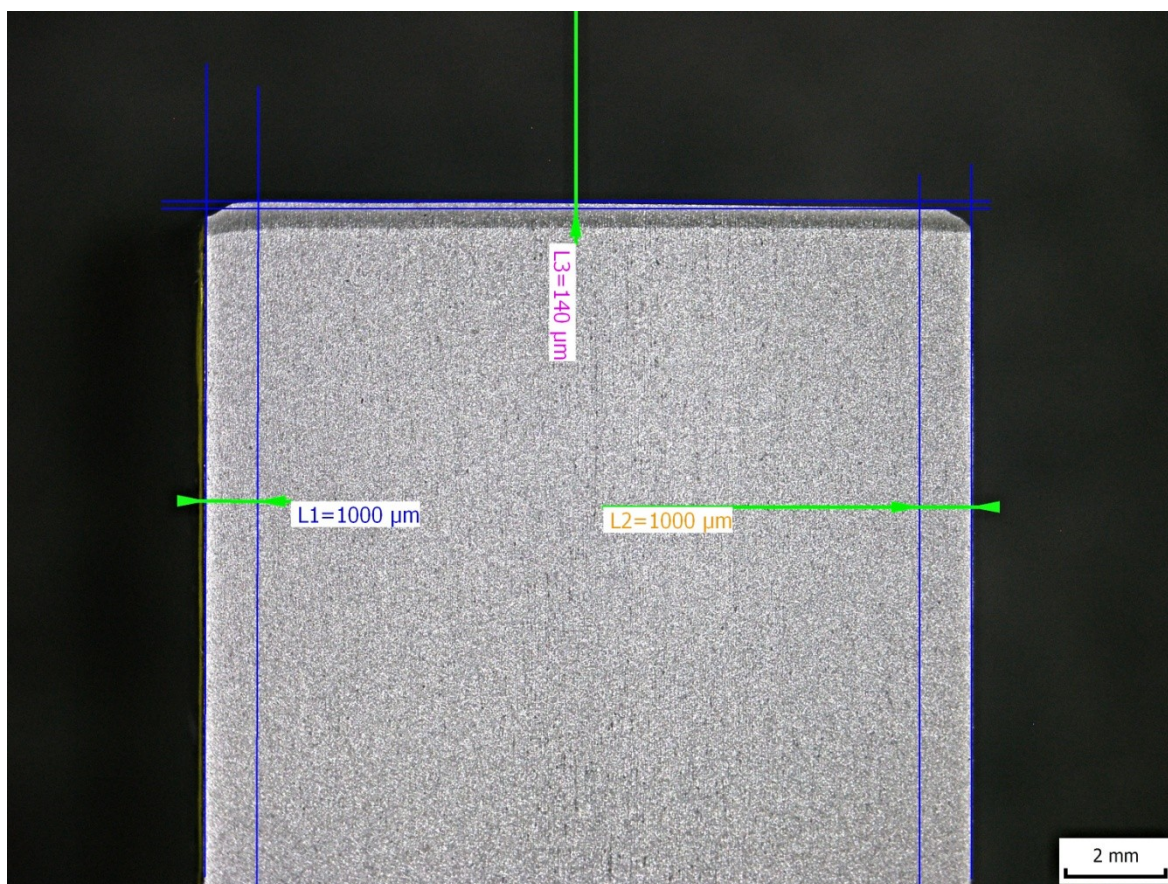
PL15, B	u = 140 μm	Tol. pole 2
---------	------------	-------------

## Průměrná výška prvků profilu Rz5

Tab. 2.37: Toleranční pole průměrné výšky prvků profilu PL15 strana B.

Měření		Průměr	Toleranční pole
1.	16,47	18,898	1
2.	17,48		
3.	25,26		
4.	19,21		
5.	16,07		
Součet	94,49		

$$Rz5 = \frac{94,49}{5} = 18,898 \quad (2.5.6)$$



Obr. 2.27: Vzorek PL15 strana B.

## Úchylka kolmosti

Tab. 2.38: Toleranční pole úchylky kolmosti pro vzorek PL20 strana A.

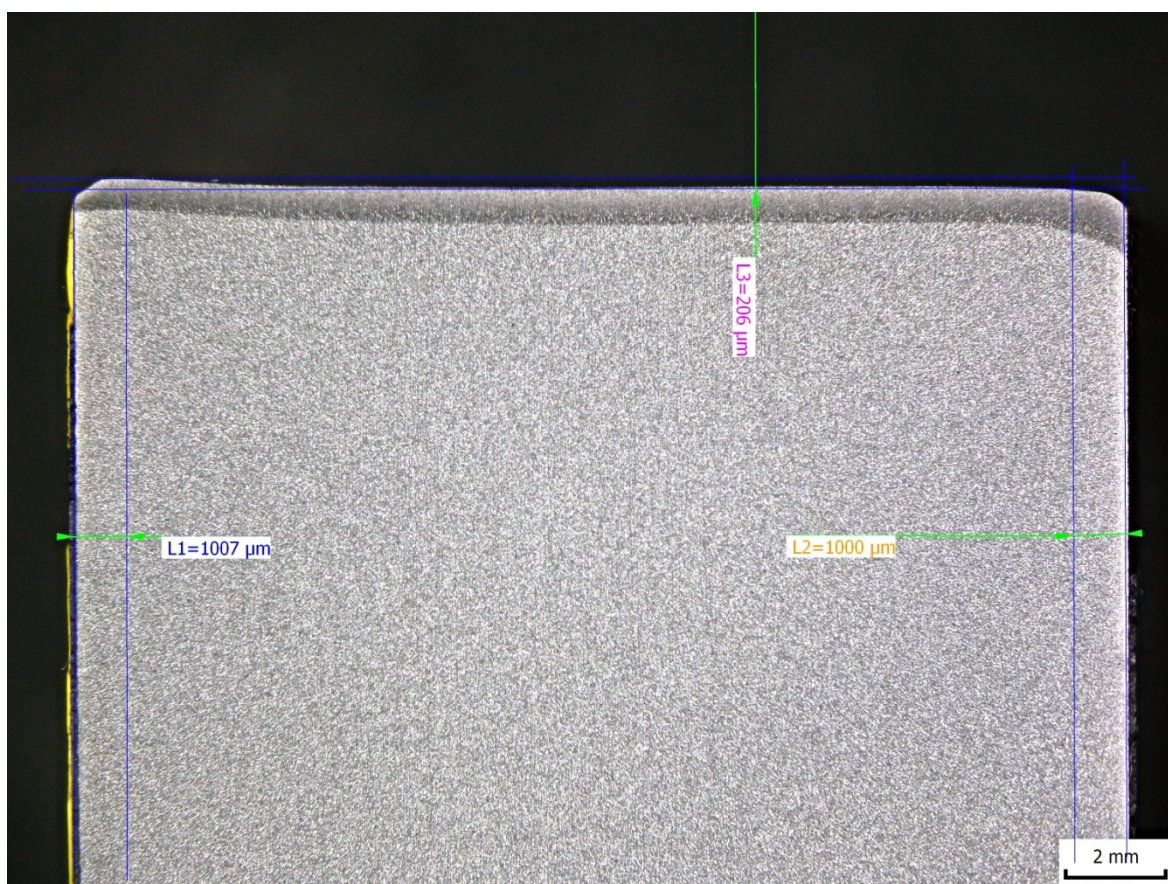
PL20, A	u = 306 μm	Tol. pole 2
---------	------------	-------------

## Průměrná výška prvků profilu Rz5

Tab. 2.39: Toleranční pole průměrné výšky prvků profilu pro vzorek PL20 strana A.

Měření		Průměr	Toleranční pole
1.	40,95	43,07	2
2.	49,15		
3.	46,93		
4.	38,1		
5.	40,22		
Součet	215,4		

$$Rz5 = \frac{215,35}{5} = 43,07 \quad (2.5.7)$$



Obr. 2.28: Vzorek PL20 strana A.



## Úchylka kolmosti

Tab. 2.40: Toleranční pole úchylky kolmosti pro vzorek PL20 strana B.

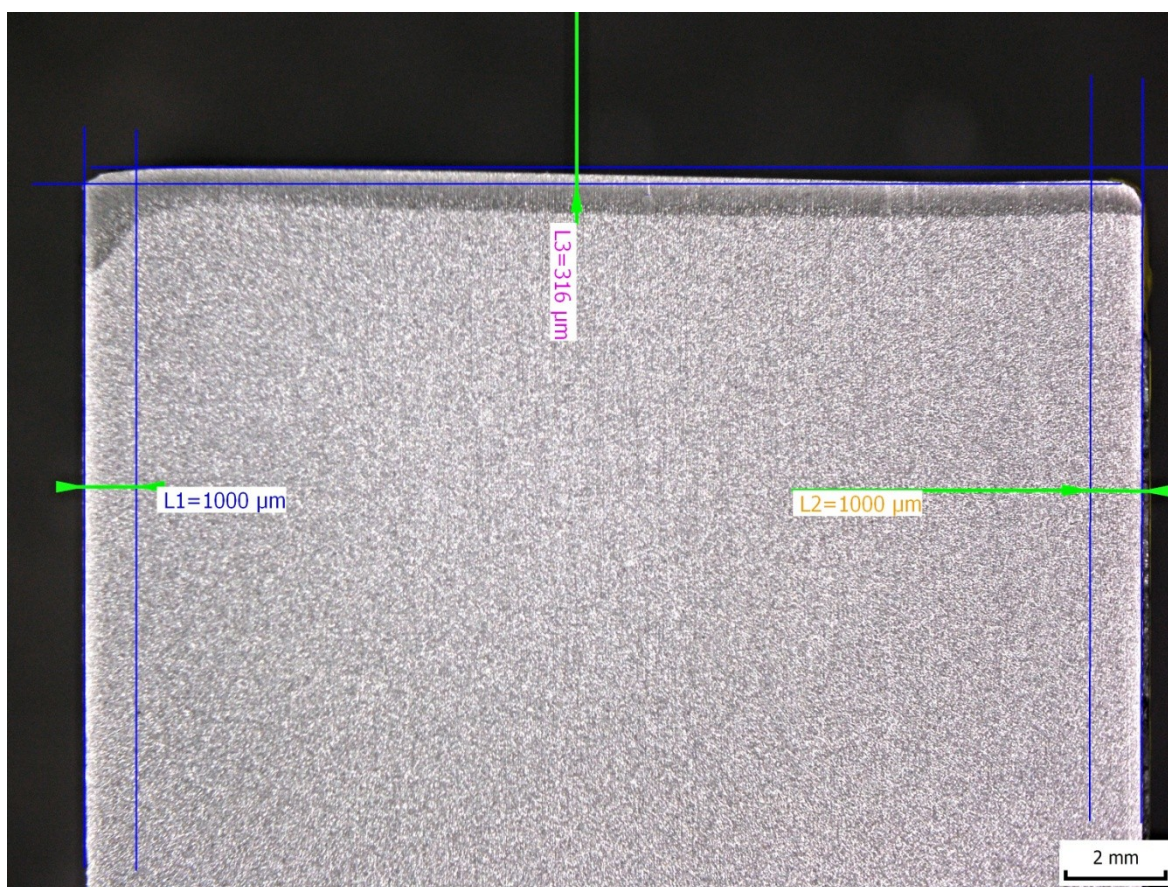
PL20, B	u = 316 μm	Tol. pole 3
---------	------------	-------------

## Průměrná výška prvků profilu Rz5

Tab. 2.41: Toleranční pole průměrné výšky prvků profilu pro vzorek PL20 strana B.

Měření		Průměr	Toleranční pole
1.	22,4	27,098	2
2.	27,6		
3.	28,72		
4.	20		
5.	36,77		
Součet	135,5		

$$Rz5 = \frac{135,49}{5} = 27,098 \quad (2.5.8)$$



Obr. 2.29: Vzorek PL20 strana B.

## Úchylka kolmosti

Tab. 2.42: Toleranční pole úchylky kolmosti pro vzorek OXY4 strana A.

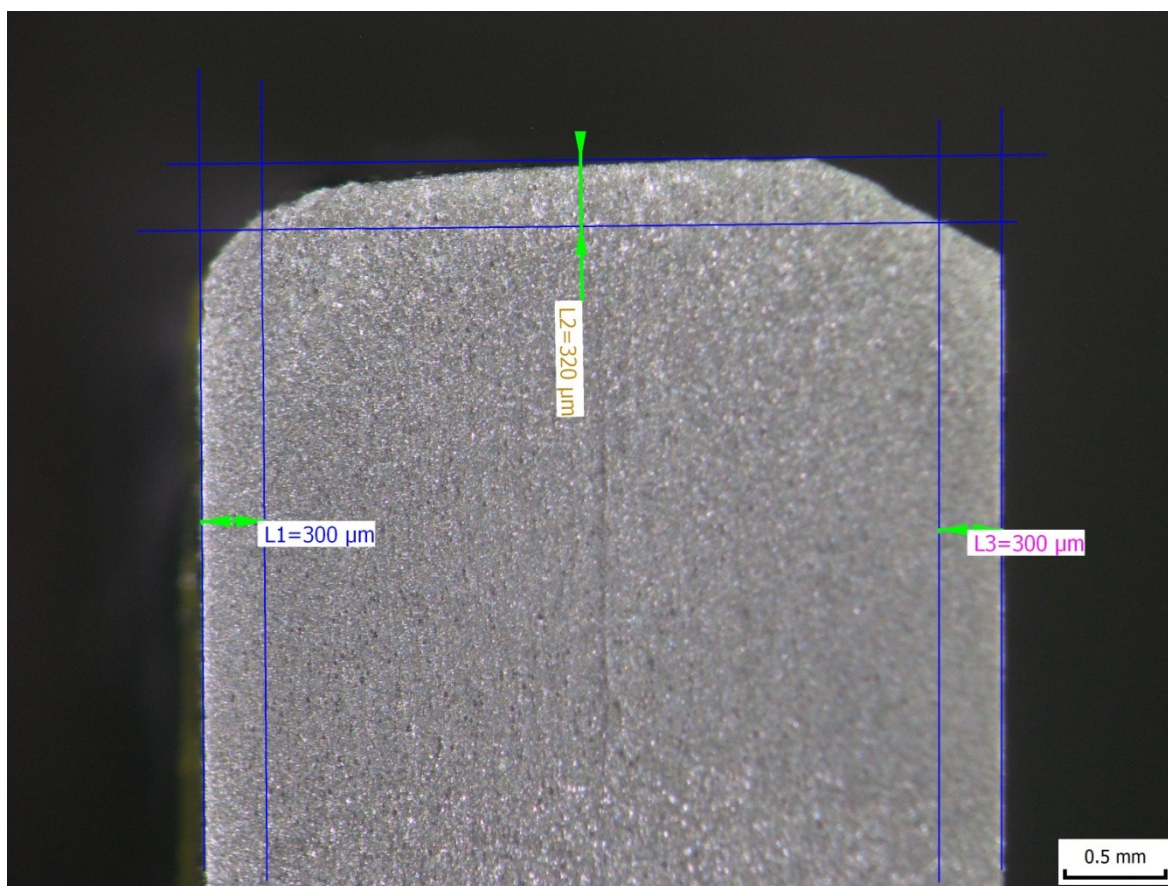
OXY4, A	u = 320 μm	Tol. pole 3
---------	------------	-------------

## Průměrná výška prvků profilu Rz5

Tab. 2.43: Toleranční pole průměrné výšky prvků profilu pro vzorek OXY4 strana A.

Měření		Průměr	Toleranční pole
1.	50,24	50,284	3
2.	48,63		
3.	44,28		
4.	53,69		
5.	54,58		
Součet	251,6		

$$Rz5 = \frac{251,42}{5} = 50,284 \quad (2.5.9)$$



Obr. 2.30: Vzorek OXY4 strana A.



## Úchylka kolmosti

Tab. 2.44: Toleranční pole úchylky kolmosti pro vzorek OXY4 strana B.

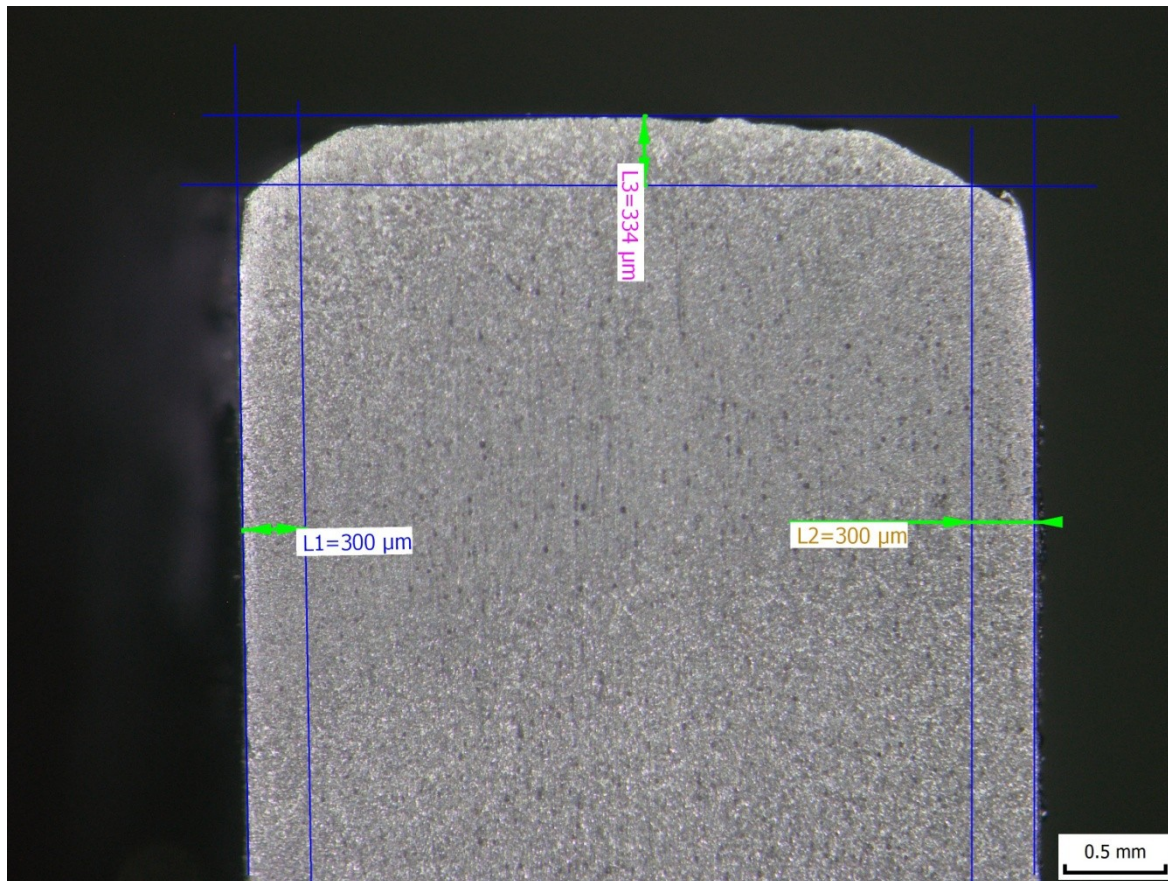
OXY4, B	u = 334 μm	Tol. pole 3
---------	------------	-------------

## Průměrná výška prvků profilu Rz5

Tab. 2.45: Toleranční pole průměrné výšky prvků profilu pro vzorek OXY4 strana B.

Měření		Průměr	Toleranční pole
1.	50,24	49,69	3
2.	50,35		
3.	48,11		
4.	47,75		
5.	52		
Součet	248,5		

$$Rz5 = \frac{248,45}{5} = 49,69 \quad (2.5.10)$$



Obr. 2.31: Vzorek OXY4 strana B.

## Úchylka kolmosti

Tab. 2.46: Toleranční pole úchylky kolmosti pro vzorek OXY10 strana A.

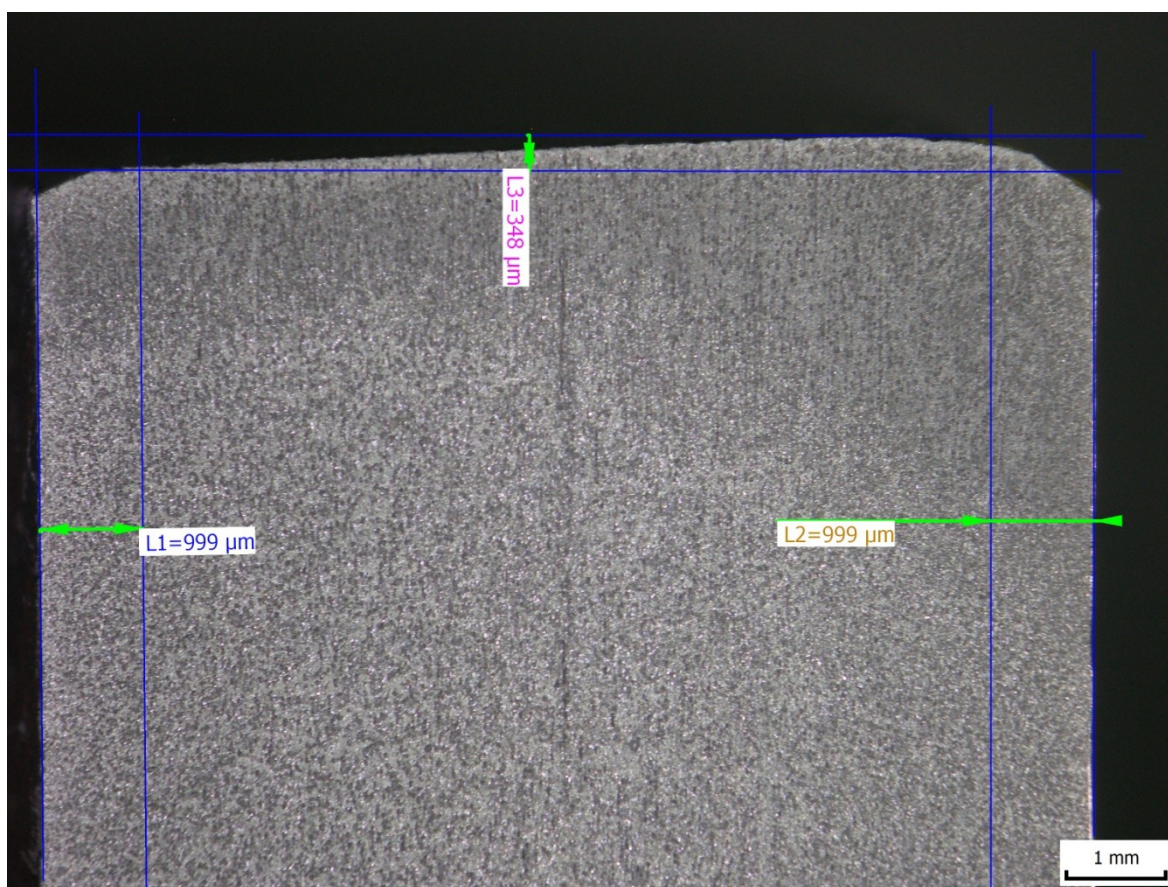
OXY10, A	u = 348 μm	Tol. pole 3
----------	------------	-------------

## Průměrná výška prvků profilu Rz5

Tab. 2.47: Toleranční pole průměrné výšky prvků profilu pro vzorek OXY10 strana A.

Měření		Průměr	Toleranční pole
1.	56,55	51,306	3
2.	53,49		
3.	48,67		
4.	48,23		
5.	49,59		
Součet	256,5		

$$Rz5 = \frac{256,53}{5} = 51,306 \quad (2.5.11)$$



Obr. 2.32: Vzorek OXY10 strana A.



## Úchylka kolmosti

Tab. 2.48: Toleranční pole úchylky kolmosti pro vzorek OXY10 strana B.

OXY10, B	u = 680 μm	Tol. pole 4
----------	------------	-------------

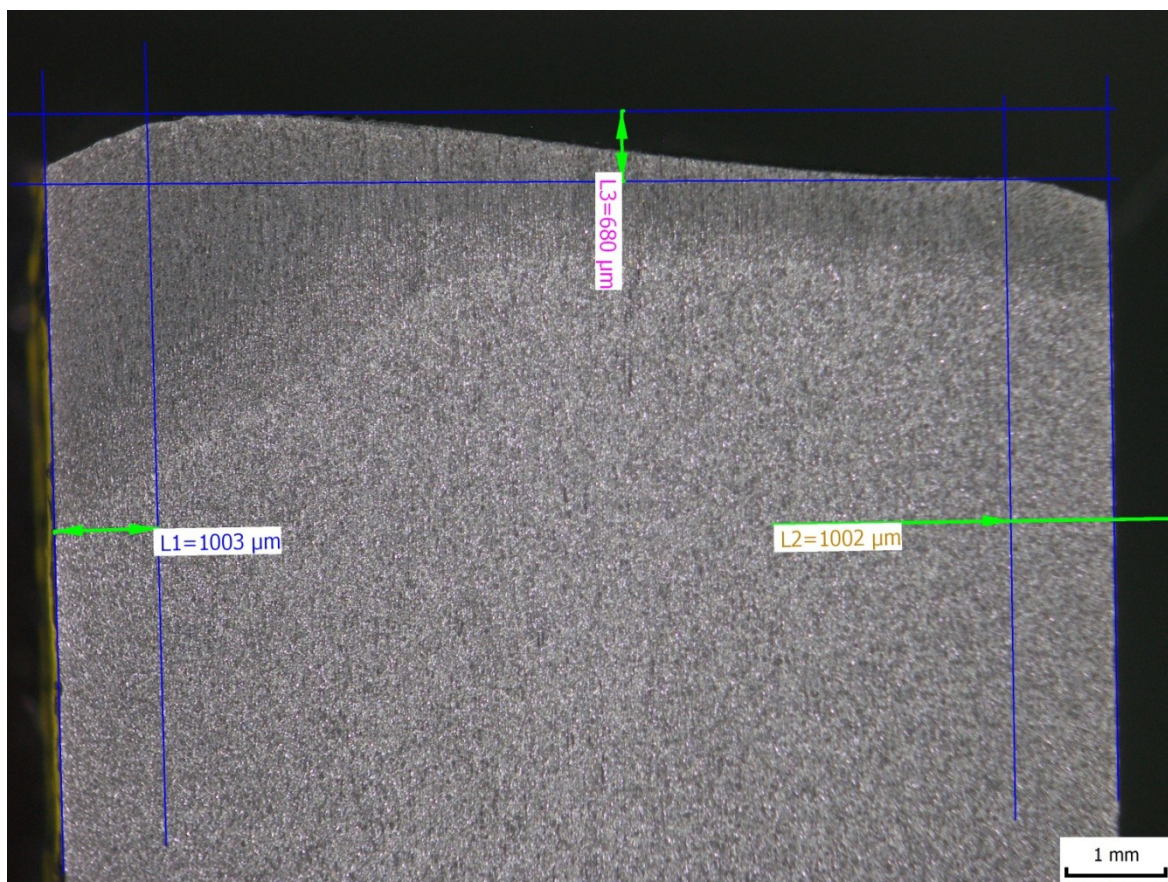
## Průměrná výška prvků profilu Rz5

Tab. 2.49: Toleranční pole průměrné výšky prvků profilu pro vzorek OXY10 strana B.

Měření		Průměr	Toleranční pole
1.	70	62,16	3
2.	63,54		
3.	58,33		
4.	58,72		
5.	60,21		
Součet	310,8		

$$Rz5 = \frac{310,8}{5} = 62,16 \quad (2.5.12)$$

Poznámka: TOO je u tohoto vzorku až trojnásobně větší než u ostatních vzorků.



Obr. 2.33: Vzorek OXY10 strana B.

## Úchylka kolmosti

Tab. 2.50: Toleranční pole úchylky kolmosti pro vzorek OXY15 strana A.

OXY15, A	u = 610 μm	Tol. pole 4
----------	------------	-------------

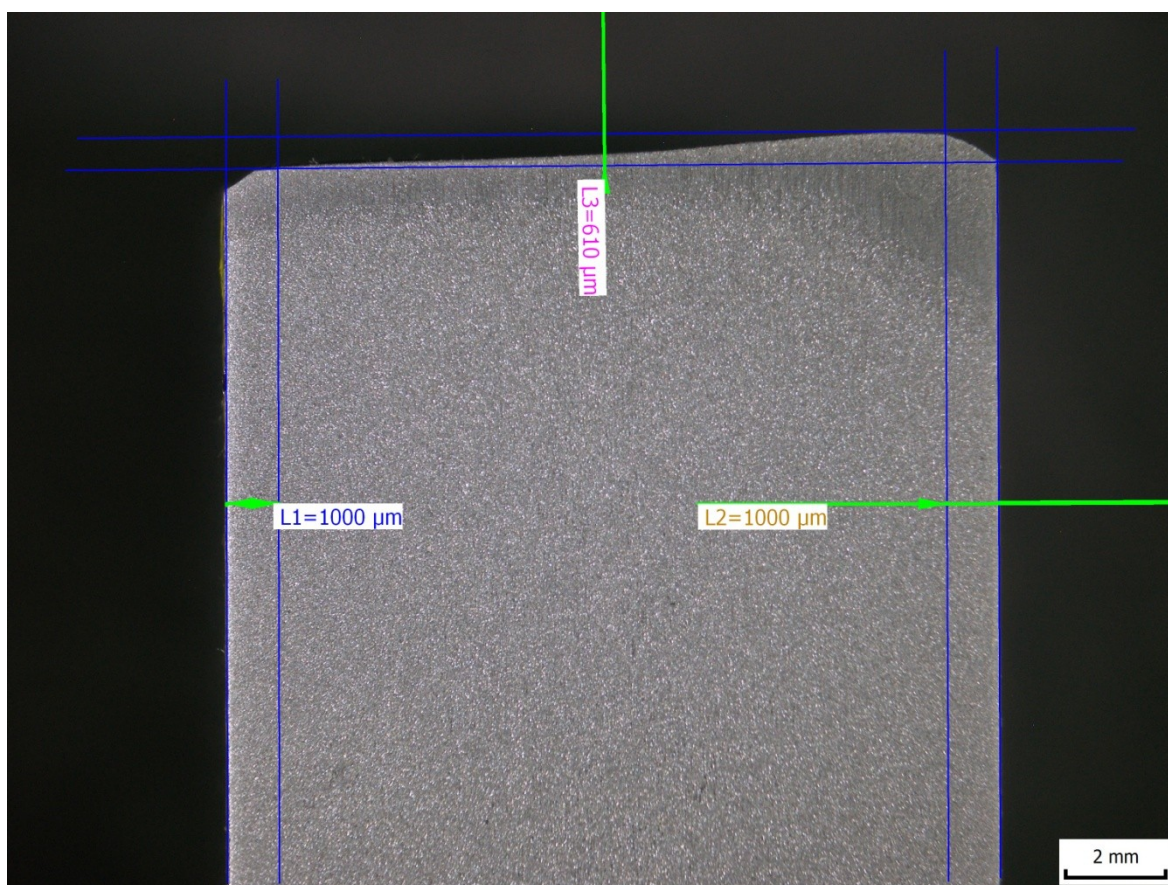
## Průměrná výška prvků profilu Rz5

Tab. 2.51: Toleranční pole průměrné výšky prvků profilu pro vzorek OXY15 strana A.

Měření		Průměr	Toleranční pole
1.	60,07	57,842	2
2.	58,29		
3.	56,32		
4.	55,21		
5.	59,32		
Součet	289,2		

$$Rz5 = \frac{289,21}{5} = 57,842 \quad (2.5.13)$$

Poznámka: TOO je u tohoto vzorku až trojnásobně větší než u ostatních vzorků.



Obr. 2.34: Vzorek OXY15 strana A.



## Úchylka kolmosti

Tab. 2.52: Toleranční pole úchylky kolmosti pro vzorek OXY15 strana B.

OXY15, B	u = 1221 μm	Tol. pole 5
----------	-------------	-------------

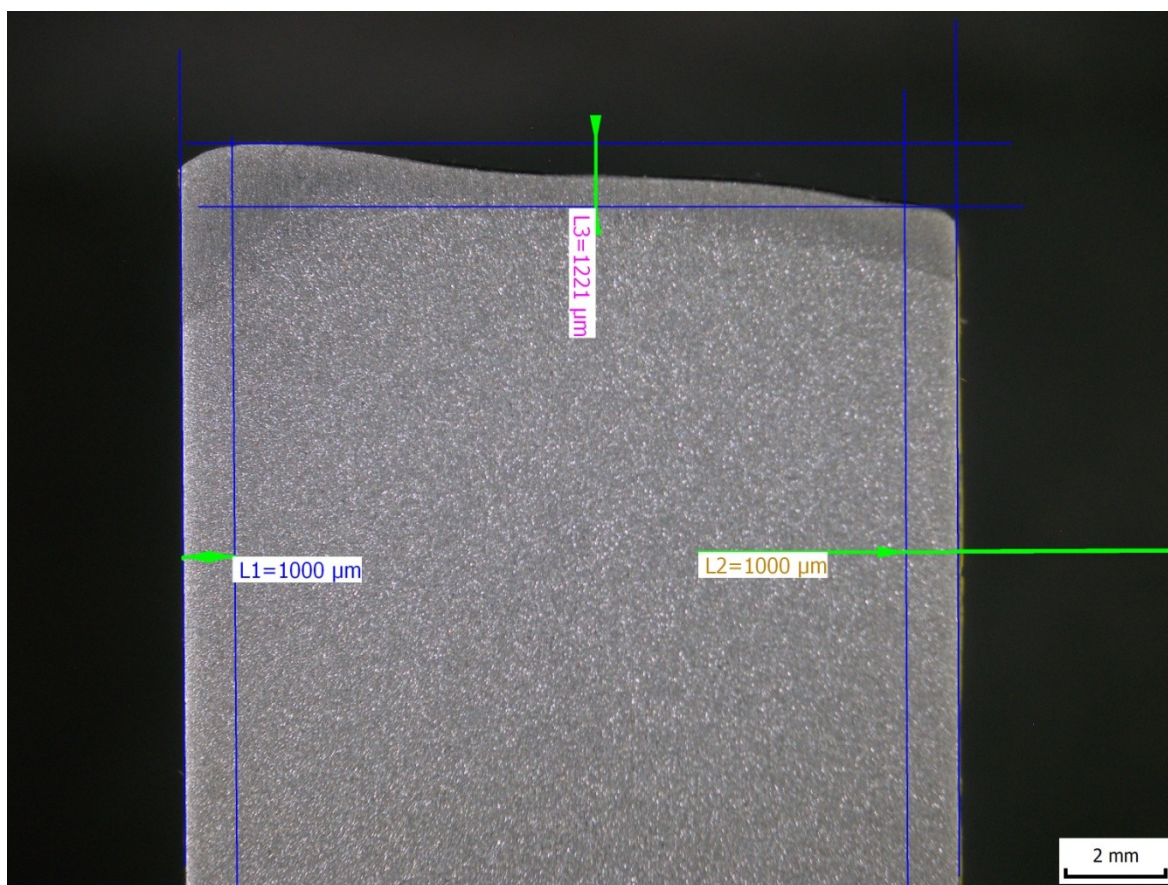
## Průměrná výška prvků profilu Rz5

Tab. 2.53: Toleranční pole průměrné výšky prvků profilu pro vzorek OXY15 strana B.

Měření		Průměr	Toleranční pole
1.	64,6	63,39	3
2.	64,12		
3.	63,42		
4.	52,47		
5.	72,34		
Součet	317		

$$Rz5 = \frac{316,95}{5} = 63,39 \quad (2.5.14)$$

Poznámka: TOO je u tohoto vzorku až trojnásobně větší než u ostatních vzorků.



Obr. 2.35: Vzorek OXY15 strana B.

## Úchylka kolmosti

Tab. 2.54: Toleranční pole úchylky kolmosti pro vzorek OXY20 strana A.

OXY20, A	u = 603 μm	Tol. pole 4
----------	------------	-------------

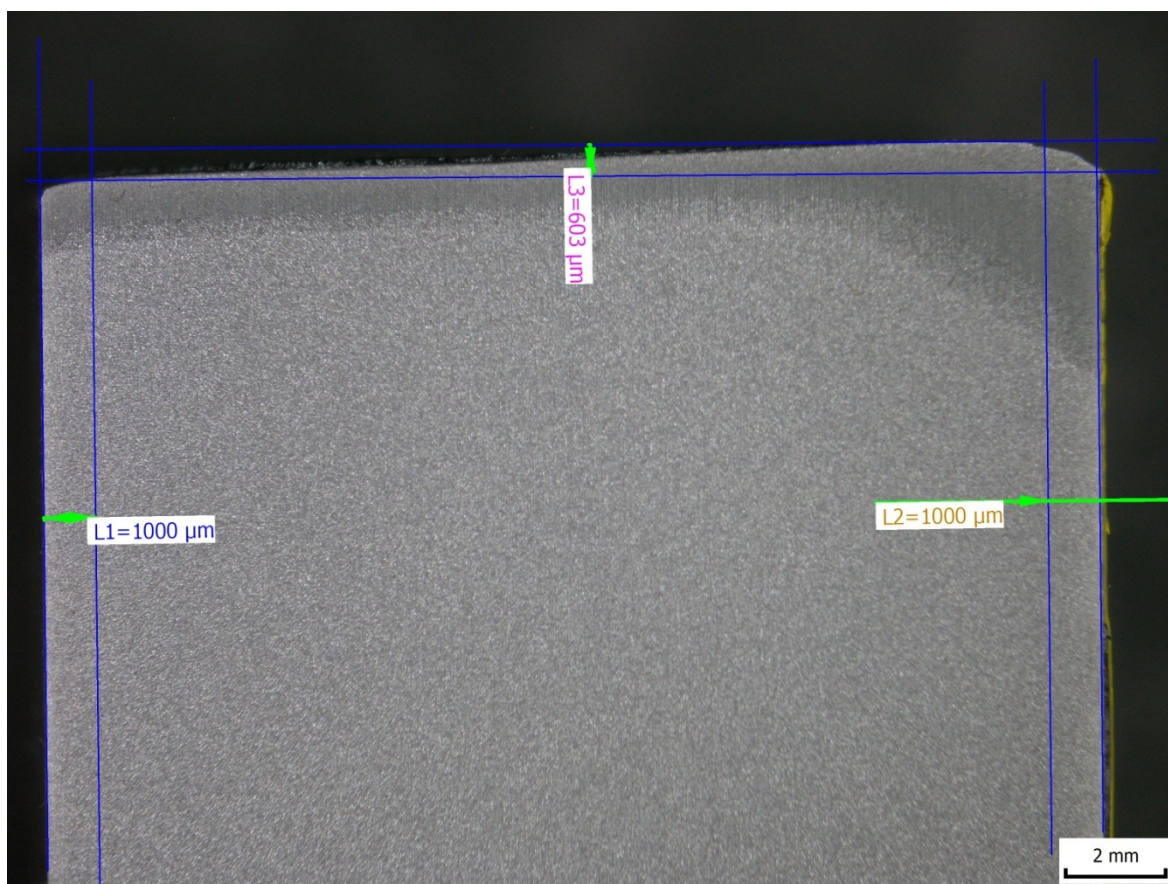
## Průměrná výška prvků profilu Rz5

Tab. 2.55: Toleranční pole průměrné výšky prvků profilu pro vzorek OXY20 strana A.

Měření		Průměr	Toleranční pole
1.	78,15	79,866	3
2.	80,67		
3.	77,68		
4.	73,21		
5.	89,62		
Součet	399,3		

$$Rz5 = \frac{399,33}{5} = 79,866 \quad (2.5.15)$$

Poznámka: TOO je u tohoto vzorku až trojnásobně větší než u ostatních vzorků.



Obr. 2.36: Vzorek OXY20 strana A.



## Úchylka kolmosti

Tab. 2.56: Toleranční pole úchylky kolmosti pro vzorek OXY20 strana B.

OXY20, B	u = 360 μm	Tol. pole 3
----------	------------	-------------

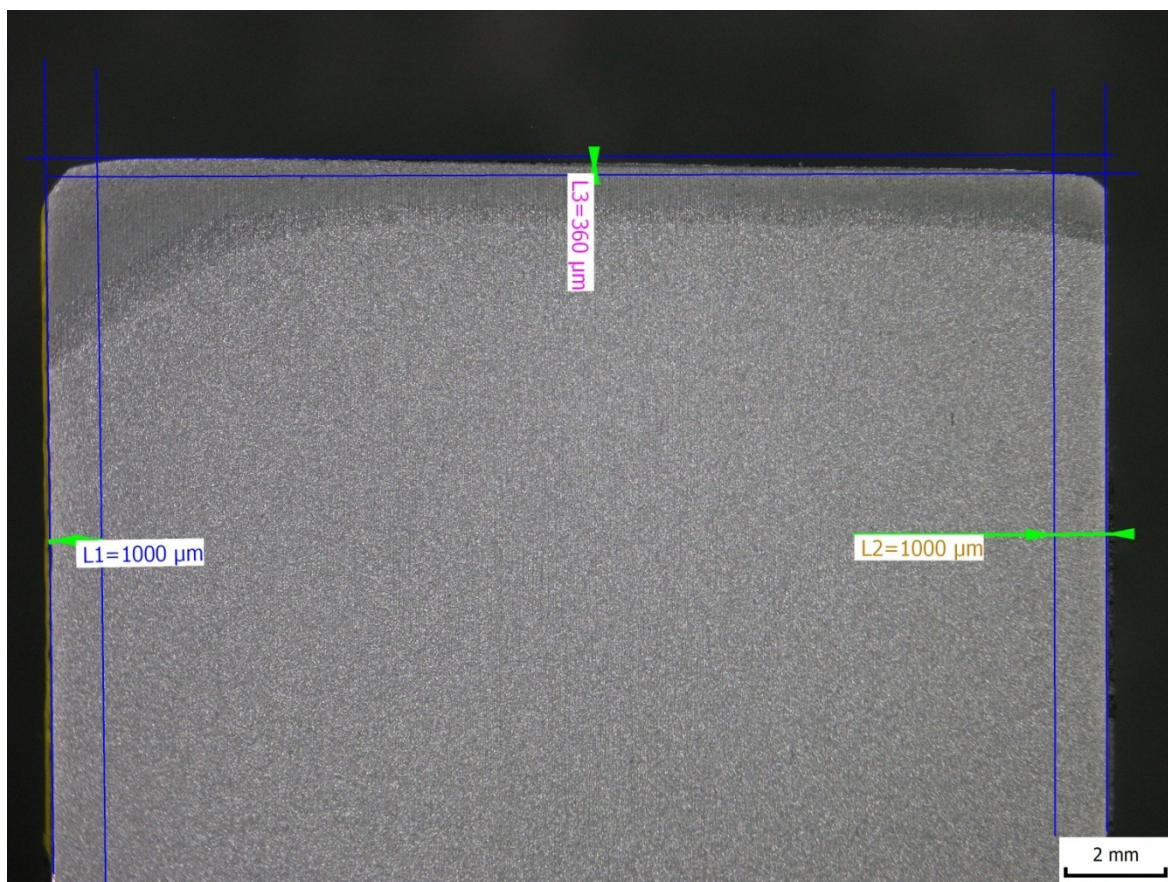
## Průměrná výška prvků profilu Rz5

Tab. 2.57: Toleranční pole průměrné výšky prvků profilu pro vzorek OXY20 strana B.

Měření		Průměr	Toleranční pole
1.	87,03	77,802	3
2.	86,24		
3.	74,28		
4.	70,22		
5.	71,24		
Součet	389		

$$Rz5 = \frac{389,01}{5} = 77,802 \quad (2.5.16)$$

Poznámka: TOO je u tohoto vzorku až trojnásobně větší než u ostatních vzorků.



Obrázek 2.37: Vzorek OXY20 strana B.

V normě ČSN EN ISO 9013 je popsáno jak získat výsledky, ale nikde není popsán postup vyhodnocení. Vyhodnocení záleží na následujících technologických operacích a podle těchto kritérií se určí, zda je vzorek vyhovující nebo nikoliv. V tomto případě vzorky, které se pohybují v tolerančním poli pro oba případy (úchylka kolmosti, průměrná výška prvků profilu) 1 – 3 lze určit za vyhovující. Tři vzorky řezané kyslíkem přesněji OXY20 strana A, OXY 15 strana A a OXY 10 strana B vyšly v tolerančním poli 4 pro úchylku kolmosti. Dá se konstatovat, že tyto vzorky už se pohybují na hranici. Vzorek řezaný kyslíkem OXY15 strana B vyšel v tolerančním poli 5 pro úchylku kolmosti což je nejhorší nejvyšší dosažitelné číslo a proto tento vzorek nelze určit jako vyhovující a řešit následné opravy nebo výrobou nového vzorku. Výsledkem je, že vzorky řezané kyslíkem mají horší kvalitu zpracování než vzorky řezané plazmou. Další viditelné rozdíly jsou v TOO. Pro plazmou řezané vzorky je tato oblast konstantně široká v celé délce řezné plochy, naopak u kyslíkem řezaných vzorků je vysoký rozdíl šíře oblasti až trojnásobně větší na začátku řezu než v jeho průběhu. Tento viditelný rozdíl může ovlivnit další následné operace.

## Závěr

Teoretická část seznámila čtenáře s dvěma metodami tepelného dělení. Metoda dělení plazmou a plamenem, které byly použity pro dělení zkušebních vzorků.

Diplomová práce se hlavně zabývala kontrolami na vzorcích o jakosti S355 a S235, které byly poskytnuty strojírenským podnikem. Při tepelném dělení byl odměřován čas v sekundách pro získání jednotlivých řezných rychlostí na jednotlivých řezných plochách. Všechny tyto hodnoty jsou vloženy do tabulek a umístěny do přílohy diplomové práce. Následně musela být provedena vizuální kontrola pro vyhodnocení určité kvality řezání dle normy ISO 17 658. Plazmou řezané vzorky jsou přesnější z hlediska rozměrů. Dle následujících technologických operací se určí zda jsou nalezené vady nepřipustné z funkčního hlediska konstrukce. Následující zkoušky byly provedeny v prostorách VŠB – TUO v laboratořích katedry mechanické technologie. Měření drsnosti bylo provedeno za pomoci přístroje Mitutoyo SJ – 301. Z důvodu velkých rozměrů měřidla a omezení měřicího ramena byly naměřeny plochy rovinné s většími rozměry. Všechny výsledky měření jsou uvedeny v tabulkách v příloze č. 4. Kyslíkem řezané vzorky mají několikrát větší drsnost, a proto se dá uvažovat nad opravou. Další měření bylo provedeno v laboratoři na tvrdoměru. Měření tvrdosti se provádělo na řezných plochách. Bylo vždy provedeno 5 vpichů na horní hraně, uprostřed a na dolní hraně. Pro zjištění rozdílu od základního materiálu byly provedeny 3 vpichy pro získání tvrdosti základního materiálu. Měření tvrdosti bylo provedeno dle Vickerse. Při měření tvrdosti bylo zjištěno, že plazmou řezané vzorky jsou nevyhovující z důvodu vysoké tvrdosti. Nejvyšší dovolená tvrdost je 380 HV. Posledním měřením bylo vyhodnocení makrostruktury. Bylo provedeno měření úchytky kolmosti „u“ a průměrná výška prvků profilu Rz5. U vzorků řezaných plazmou se kolmost a výška prvků profilu pohybuje v nižších tolerančních polích než u vzorků řezaných kyslíkem. V tomto případě ale vyhodnocení nejde zpracovat, a proto bez zadaných podmínek se nedá přesně určit, jaké vzorky jsou nevyhovující. Dalším ovlivňujícím faktorem pro vzorky řezané kyslíkem je až několikanásobně širší TOO než u vzorků řezaných plazmou. Norma EN 1090-2 uvádí maximální přípustné hodnoty tvrdosti pro jednotlivé jakosti ocelí. Do přílohy č. 2 jsou vloženy protokoly CPQR vzorků, které měli vyhovující všechny výsledky. Vyhovujícími jsou kyslíkem řezané vzorky o jakosti S355 tloušťky 20, 10 a 4 mm. Pro tloušťku 20 a 10 mm byla úchytky kolmosti v tolerančním poli 4. Pokud vizuální zkouška nemá vliv na funkčnost konstrukce, může se konstatovat, že vzorky řezané plamenem jsou vyhovující. Touto prací bylo ověřeno, že tepelné dělení dle normy ČSN EN 1090-2 a ozkoušené dle norem ČSN EN ISO 9013, ČSN EN ISO 17658 a ČSN EN 1090-2 je vhodnější použít řezání kyslíkem ale z důvodu vyššího počtu vad a drsnosti se musí dbát na technologické parametry.

## Poděkování

V první řadě bych rád poděkoval mému vedoucímu práce panu Ing. Martinu Sondelovi, Ph.D. za případné konzultace. Dále za ochotu a poskytnutí zkušebního materiálu panu Ing. René Trnkovi a jeho spolupracovníkům. Tato řada měření a hodnot by nemohla být provedena bez ochoty VŠB – TUO a propůjčení její laboratoří. Velice rád proto děkuji panu Ing. René Siostrzonkovi, Ph.D. za půjčení drsnoměru Mitutoyo SJ – 301. Za velikou ochotu, rady ohledně prováděných měření a zapůjčení vybavení a strojů bych hlavně chtěl poděkovat panu Ing. Zdeňku Štorkánovi.

## Použitá literatura

- [1] ČSN EN ISO 9013 *Tepelné dělení - klasifikace tepelných řezů - Geometrické požadavky na výrobky a úchylky jakosti řezu*. 2013.
- [2] KOUKAL, Jaroslav, Drahomír SCHWARZ a Jiří HAJDÍK. *Materiály a jejich svařitelnost*. 1. vyd. Ostrava: Český svářečský ústav, 2009, 240 s. ISBN 978-80-248-2025-5.
- [3] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie: Advanced methods of material removal*. 1. vyd. Košice: Viena, 2000. ISBN 80-7099-430-4.
- [4] SEDLÁK, Ondřej. *Technologie řezání plazmovým paprskem*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Karel Osička, Ph.D.
- [5] MIČIETOVÁ, Anna. *Nekonvenčné metódy obrábania*. 1. Žilina: EDIS, 2001. ISBN 80-7100-853-2.
- [6] Dělení kovů plazmatem. *MM Průmyslové spektrum: Spojování a dělení* [online]. 2001 [cit. 2016-03-25]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/deleni-kovu-plazmatem.html>
- [7] ČSN EN 1090-2 *Postup při kontrole schopnosti tepelných procesů řezání*. 2014.
- [8] ČSN EN ISO 17658 *Svařování - Vady při řezání kyslíkem, laserem a plasmou - Terminologie*. 2015.

## Internetové zdroje

- [9] [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory\\_soubory/hsv\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_deleni\\_a\\_svarovani\\_plasmou\\_2013\\_mrna.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv_specialni_metody_svarovani_deleni_a_svarovani_plasmou_2013_mrna.pdf)



## Seznam příloh

Příloha č. 1: Tabulka jakostí a ekvivalentního uhlíku

Příloha č. 2: Klasifikace postupu řezání CPQR

Příloha č. 3: Hodnoty naměřených časů

Příloha č. 4: Hodnoty drsnosti

Příloha č. 5: Hodnoty tvrdostí

Příloha č. 1: Tabulka jakostí a ekvivalentního uhlíku

Jakost	Tloušťka [mm]	Uhlíkový ekvivalent [%]
S355	4	0,468
S235	5	0,215
S355	10	0,425
S235	10	0,194
S355	15	0,432
S235	16	0,182
S355	20	0,421
S235	20	0,147

Příloha č. 2: Klasifikace postupu řezání CPQR

Kvalifikace postupu řezání					
<u>(p)CPS-No:</u>	-	<u>CPQR-No:</u>	DP2016.OXY4		
<u>Výroba tepelně řezaného výrobku:</u>	Kyslík				
<u>Adresa výrobce:</u>	XXX	<u>Přílohy:</u>	<u>1</u>	<u>Řezání - parametry:</u>	<u>Strana</u>
<u>Standard:</u>	-		<u>2</u>	<u>Protokol zkouš. Mat.</u>	<u>Strana</u>
<u>Datum výroby:</u>	10.3.2016		<u>3</u>	<u>Osvědčení o prohlídce</u>	<u>Strana</u>
<u>Výrobce:</u>	XXX		-		
Specifikace kvalifikace postupu řezání					
<u>Řezací proces:</u>	Kyslík				
<u>Výrobce řezacího stroje</u>	PIERCE				
<u>Typ řezu:</u>	Standardní řezání 0°				
<u>Označení řezacího hořáku:</u>	-				
<u>Označení řezací trysky:</u>	3/0VVC				
<u>Výrobce řezacího hořáku/trysky:</u>	PIERCE/HARRIS				
<u>Standard:</u>	-				
<u>Skupina materiálu:</u>	S355				
<u>Tloušťka materiálu (mm):</u>	4				
<u>Druh topného plynu:</u>	Zemní plyn				
<u>Tlak kyslíku:*</u>	0%/-20%				
<u>Tlak plynného paliva:*</u>	±5%				
<u>Tlak řezného kyslíku:*</u>	0%/-20%				
<u>Nastavení tepelného plamene:</u>	Tabulková hodnota				
<u>Řezná rychlost:</u>	10%/-0%				
<u>Řezná vzdálenost</u>	±10%				
<u>Teplota přehřevu:</u>	±10%				
<u>Teplota zacházení:</u>	-				
<u>Druh před/po ohřevu plamenem:</u>	-				
<u>Označení tepelného hořáku:</u>	-				
<u>Výrobce tepelného hořáku:</u>	PIERCE				
<u>Druh topného plynu:</u>	Zemní plyn				
<u>Kyslík/tlak stlačeného vzduchu (Bar):</u>	7				
<u>Tlak topného plynu (Bar):</u>	0,9				
<u>*Tlak měřitelný na vstupu do hořáku</u>					
Tento záznam potvrzuje, že výroba tepelně odříznutého vzorku byla dostatečně připravena, postupy a testy podle předpisu na 6.4.3 a 6.4.4 normy EN 1090-2: EXC2 / EXC3 / EXC4 (nehodící se škrtněte)					

Kvalifikace postupu řezání					
<u>(p)CPS-No:</u>	-	<u>CPQR-No:</u>	<u>DP2016.OXY10</u>		
<u>Výroba tepelně řezaného výrobku:</u>	Kyslík				
<u>Adresa výrobce:</u>	XXX	<u>Přílohy:</u>	<u>1</u>	<u>Řezání - parametry:</u>	<u>Strana</u>
<u>Standard:</u>			<u>2</u>	<u>Protokol zkouš. Mat.</u>	<u>Strana</u>
<u>Datum výroby:</u>			<u>3</u>	<u>Osvědčení o prohlídce</u>	<u>Strana</u>
<u>Výrobce:</u>			-		
Specifikace kvalifikace postupu řezání					
<u>Řezací proces:</u>	Kyslík				
<u>Výrobce řezacího stroje</u>	PIERCE				
<u>Typ řezu:</u>	Standardní řezání 0°				
<u>Označení řezacího hořáku:</u>	-				
<u>Označení řezací trysky:</u>	00VVC				
<u>Výrobce řezacího hořáku/trysky:</u>	PIERCE/HARRIS				
<u>Standard:</u>	-				
<u>Skupina materiálu:</u>	S355				
<u>Tloušťka materiálu (mm):</u>	10				
<u>Druh topného plynu:</u>	Zemní plyn				
<u>Tlak kyslíku:*</u>	0%/-20%				
<u>Tlak plynného paliva:*</u>	±5%				
<u>Tlak řezného kyslíku:*</u>	0%/-20%				
<u>Nastavení tepelného plamene:</u>	Tabulková hodnota				
<u>Řezná rychlost:</u>	10%/-0%				
<u>Řezná vzdálenost</u>	±10%				
<u>Teplota přehřevu:</u>	±10%				
<u>Teplota zacházení:</u>	-				
<u>Druh před/po ohřevu plamenem:</u>	-				
<u>Označení tepelného hořáku:</u>	-				
<u>Výrobce tepelného hořáku:</u>	PIERCE				
<u>Druh topného plynu:</u>	Zemní plyn				
<u>Kyslík/tlak stlačeného vzduchu:</u>	7				
<u>Tlak topného plynu:</u>	0,9				
*Tlak měřitelný na vstupu do hořáku					
Tento záznam potvrzuje, že výroba tepelně odříznutého vzorku byla dostatečně připravena, postupy a testy podle předpisu na 6.4.3 a 6.4.4 normy EN 1090-2: EXC2 / EXC3 / EXC4 (nehodící se škrtněte)					

Kvalifikace postupu řezání					
<u>(p)CPS-No:</u>	-	<u>CPQR-No:</u>	<u>DP2016.OXY20</u>		
<u>Výroba tepelně řezaného výrobku:</u>	Kyslík				
<u>Adresa výrobce:</u>	<u>XXX</u>	<u>Přílohy:</u>	<u>1</u>	<u>Řezání - parametry:</u>	<u>Strana</u>
<u>Standard:</u>	-		<u>2</u>	<u>Protokol zkouš. Mat.</u>	<u>Strana</u>
<u>Datum výroby:</u>	10.3.2016		<u>3</u>	<u>Osvědčení o prohlídce</u>	<u>Strana</u>
<u>Výrobce:</u>	XXX		-		
Specifikace kvalifikace postupu řezání					
<u>Řezací proces:</u>	Kyslík				
<u>Výrobce řezacího stroje</u>	PIERCE				
<u>Typ řezu:</u>	Standardní řezání 0°				
<u>Označení řezacího hořáku:</u>	-				
<u>Označení řezací trysky:</u>	0VVC				
<u>Výrobce řezacího hořáku/trysky:</u>	PIERCE/HARRIS				
<u>Standard:</u>	-				
<u>Skupina materiálu:</u>	S355				
<u>Tloušťka materiálu (mm):</u>	20				
<u>Druh topného plynu:</u>	Zemní plyn				
<u>Tlak kyslíku:*</u>	0%/-20%				
<u>Tlak plynného paliva:*</u>	±5%				
<u>Tlak řezného kyslíku:*</u>	0%/-20%				
<u>Nastavení tepelného plamene:</u>	Tabulková hodnota				
<u>Řezná rychlost:</u>	10%/-0%				
<u>Řezná vzdálenost</u>	±10%				
<u>Teplota přehřevu:</u>	±10%				
<u>Teplota zacházení:</u>	-				
<u>Druh před/po ohřevu plamenem:</u>	-				
<u>Označení tepelného hořáku:</u>	-				
<u>Výrobce tepelného hořáku:</u>	PIERCE				
<u>Druh topného plynu:</u>	Zemní plyn				
<u>Kyslík/tlak stlačeného vzduchu:</u>	6,5				
<u>Tlak topného plynu:</u>	0,9				
*Tlak měřitelný na vstupu do hořáku					
Tento záznam potvrzuje, že výroba tepelně odříznutého vzorku byla dostatečně připravena, postupy a testy podle předpisu na 6.4.3 a 6.4.4 normy EN 1090-2: EXC2 / EXC3 / EXC4 (nehodící se škrtněte)					

Příloha č. 3: Hodnoty naměřených časů

S355 Plazma

4mm	úsek	1	2	3	4	5	6	7	celkem
	čas [s]	6	3	6	6	2	2	3	28
10mm	úsek	1	2	3	4	5	6	7	celkem
	čas [s]	13	3	13	13	5	6	6	59
15mm	úsek	1	2	3	4	5	6	7	celkem
	čas [s]	21	3	21	21	4	6	5	81
20mm	úsek	1	2	3	4	5	6	7	celkem
	čas [s]	25	7	41	39	6	4	6	128

S235 Plazma

5mm	úsek	1	2	3	4	5	6	7	celkem
	čas [s]	6	3	6	6	2	1	3	27
10mm	úsek	1	2	3	4	5	6	7	celkem
	čas [s]	13	3	13	12	4	6	6	57
16mm	úsek	1	2	3	4	5	6	7	celkem
	čas [s]	19	3	18	19	5	4	6	74
20mm	úsek	1	2	3	4	5	6	7	celkem
	čas [s]	24	7	37	40	6	4	4	122

S355 Plamen

4mm	úsek	1	2	3	4	5	6	7	celkem
	čas [s]	34	8	41	41	10	8	12	154
10mm	úsek	1	2	3	4	5	6	7	celkem
	čas [s]	35	10	45	45	13	9	13	170
15mm	úsek	1	2	3	4	5	6	7	celkem
	čas [s]	49	11	54	54	14	9	10	201
20mm	úsek	1	2	3	4	5	6	7	celkem
	čas [s]	53	12	62	63	18	12	19	239

S235 Plamen

5mm	úsek	1	2	3	4	5	6	7	celkem
	čas [s]	36	7	40	39	11	8	12	153
10mm	úsek	1	2	3	4	5	6	7	celkem
	čas [s]	37	10	47	47	15	9	14	179
16mm	úsek	1	2	3	4	5	6	7	celkem
	čas [s]	50	12	54	55	17	11	16	215
20mm	úsek	1	2	3	4	5	6	7	celkem
	čas [s]	53	15	62	62	20	12	19	243

Příloha č. 4: Hodnoty drsnosti

Plazma S355			
(4mm)			
XRa1	(2,60±0,55)	XRz1	(14,31±0,78)
XRa2	(2,66±0,64)	XRz2	(15,90±1,04)
XRa3	(2,60±0,36)	XRz3	(13,27±3,60)
XRa4	(3,29±0,64)	XRz4	(16,56±1,84)
XRa5	(3,57±0,84)	XRz5	(14,29±1,51)
XRa6	(2,53±0,50)	XRz6	(17,56±1,51)
XRa7	(3,25±0,52)	XRz7	(16,61±0,97)
(10mm)			
XRa1	(2,48±0,42)	XRz1	(13,87±1,35)
XRa2	(9,02±2,66)	XRz2	(38,05±10,32)
XRa3	(4,94±0,60)	XRz3	(23,30±3,48)
XRa4	(2,31±0,64)	XRz4	(14,69±1,76)
XRa5	(7,19±2,96)	XRz5	(34,64±6,53)
XRa6	(2,15±0,21)	XRz6	(12,31±1,23)
XRa7	(6,40±2,29)	XRz7	(26,19±6,76)
(15mm)			
XRa1	(3,78±0,67)	XRz1	(22,76±5,72)
XRa2	(4,30±1,56)	XRz2	(21,63±7,09)
XRa3	(4,48±1,47)	XRz3	(20,83±4,94)
XRa4	(3,69±1,23)	XRz4	(19,36±5,67)
XRa5	(6,80±1,77)	XRz5	(31,87±4,66)
XRa6	(3,85±0,73)	XRz6	(23,60±1,88)
XRa7	(3,69±0,35)	XRz7	(18,90±4,66)
(20mm)			
XRa1	(5,11±0,56)	XRz1	(34,38±5,43)
XRa2	(5,43±0,21)	XRz2	(43,07±5,86)
XRa3	(3,43±1,02)	XRz3	(24,73±5,36)
XRa4	(4,14±0,82)	XRz4	(39,36±5,72)
XRa5	(4,22±0,71)	XRz5	(29,01±8,36)
XRa6	(4,78±0,40)	XRz6	(37,67±4,70)
XRa7	(4,38±2,24)	XRz7	(27,10±8,07)

Plazma S325			
(5mm)			
XRa1	(2,71±0,44)	XRz1	(13,17±1,56)
XRa2	(2,51±0,49)	XRz2	(11,33±2,64)
XRa3	(2,78±0,46)	XRz3	(12,86±1,90)
XRa4	(2,86±0,82)	XRz4	(13,08±3,41)
XRa5	(3,36±0,44)	XRz5	(14,38±1,33)
XRa6	(2,40±0,51)	XRz6	(14,60±1,61)
XRa7	(3,63±0,62)	XRz7	(16,31±1,68)
(10mm)			
XRa1	(5,28±0,66)	XRz1	(19,87±3,01)
XRa2	(2,93±1,04)	XRz2	(2,93±8,52)
XRa3	(1,87±0,41)	XRz3	(13,16±2,40)
XRa4	(5,49±1,54)	XRz4	(24,76±5,60)
XRa5	(5,34±1,38)	XRz5	(24,88±6,63)
XRa6	(4,64±0,63)	XRz6	(18,48±1,44)
XRa7	(3,29±0,44)	XRz7	(14,53±0,78)
(16mm)			
XRa1	(6,44±0,87)	XRz1	(25,30±5,07)
XRa2	(4,59±0,81)	XRz2	(28,65±8,06)
XRa3	(2,51±0,60)	XRz3	(15,61±1,81)
XRa4	(7,14±1,61)	XRz4	(30,55±5,13)
XRa5	(5,70±2,15)	XRz5	(30,30±8,75)
XRa6	(4,38±0,47)	XRz6	(19,27±2,11)
XRa7	(4,14±1,44)	XRz7	(21,47±5,64)
(20mm)			
XRa1	(3,36±0,53)	XRz1	(16,99±5,63)
XRa2	(6,26±0,70)	XRz2	(33,06±2,63)
XRa3	(3,27±0,99)	XRz3	(18,26±2,81)
XRa4	(3,36±0,51)	XRz4	(23,71±3,12)
XRa5	(4,97±0,75)	XRz5	(28,10±1,23)
XRa6	(3,54±0,71)	XRz6	(26,21±4,76)
XRa7	(3,56±0,73)	XRz7	(24,20±5,38)

Plamen S355			
(4mm)			
XRa1	(11,35±1,32)	XRz1	(59,38±2,19)
XRa2	(10,31±2,22)	XRz2	(50,28±5,15)
XRa3	(11,32±4,07)	XRz3	(62,69±9,55)
XRa4	(7,65±1,29)	XRz4	(42,94±14,03)
XRa5	(12,76±1,92)	XRz5	(55,96±5,03)
XRa6	(11,38±1,08)	XRz6	(50,45±1,59)
XRa7	(10,95±2,46)	XRz7	(49,69±2,18)
(10mm)			
XRa1	(9,86±1,37)	XRz1	(72,98±6,12)
XRa2	(10,33±1,78)	XRz2	(51,31±4,46)
XRa3	(11,30±2,25)	XRz3	(96,74±9,07)
XRa4	(10,19±3,71)	XRz4	(80,57±18,15)
XRa5	(11,18±2,83)	XRz5	(76,31±9,27)
XRa6	(11,17±1,95)	XRz6	(39,69±3,20)
XRa7	(10,78±1,68)	XRz7	(62,16±6,01)
(15mm)			
XRa1	(8,21±1,04)	XRz1	(56,29±3,72)
XRa2	(11,55±1,75)	XRz2	(57,84±2,53)
XRa3	(11,76±2,14)	XRz3	(57,84±5,17)
XRa4	(10,87±3,01)	XRz4	(65,71±9,85)
XRa5	(12,63±1,76)	XRz5	(62,17±3,86)
XRa6	(7,43±0,92)	XRz6	(77,37±4,26)
XRa7	(11,22±4,26)	XRz7	(63,39±8,81)
(20mm)			
XRa1	(9,99±1,57)	XRz1	(71,78±2,10)
XRa2	(10,82±1,45)	XRz2	(79,87±7,55)
XRa3	(9,79±2,08)	XRz3	(89,19±9,88)
XRa4	(11,95±3,55)	XRz4	(79,23±10,32)
XRa5	(10,83±2,02)	XRz5	(80,21±14,68)
XRa6	(8,20±2,32)	XRz6	(62,18±4,66)
XRa7	(10,18±1,53)	XRz7	(77,80±10,19)



Plamen S325			
(5mm)			
XRa1	(6,61±0,64)	XRz1	(39,08±3,01)
XRa2	(8,63±3,74)	XRz2	(52,97±21,31)
XRa3	(11,55±2,31)	XRz3	(70,97±5,69)
XRa4	(13,00±1,11)	XRz4	(64,20±1,31)
XRa5	(10,80±1,79)	XRz5	(61,60±2,22)
XRa6	(11,14±2,71)	XRz6	(43,40±5,09)
XRa7	(9,17±0,84)	XRz7	(47,83±0,67)
(10mm)			
XRa1	(12,46±1,54)	XRz1	(90,93±3,59)
XRa2	(7,34±3,22)	XRz2	(27,63±2,13)
XRa3	(12,39±2,10)	XRz3	(79,50±10,50)
XRa4	(18,49±4,55)	XRz4	(73,37±33,57)
XRa5	(18,10±4,69)	XRz5	(99,89±7,83)
XRa6	(7,91±1,19)	XRz6	(43,75±4,10)
XRa7	(8,45±0,62)	XRz7	(45,38±3,14)
(16mm)			
XRa1	(19,46±1,56)	XRz1	(82,61±10,08)
XRa2	(10,25±0,61)	XRz2	(48,15±2,67)
XRa3	(10,63±1,26)	XRz3	(54,35±5,17)
XRa4	(11,19±4,53)	XRz4	(41,49±14,57)
XRa5	(9,56±1,64)	XRz5	(74,37±7,52)
XRa6	(13,07±2,24)	XRz6	(85,93±14,73)
XRa7	(8,71±1,44)	XRz7	(45,99±7,22)
(20mm)			
XRa1	(12,89±1,92)	XRz1	(55,52±2,79)
XRa2	(11,56±1,87)	XRz2	(11,56±7,59)
XRa3	(11,46±2,17)	XRz3	(11,46±11,22)
XRa4	(12,27±1,52)	XRz4	(12,27±4,14)
XRa5	(14,52±1,49)	XRz5	(67,52±6,42)
XRa6	(13,52±1,98)	XRz6	(61,81±3,17)
XRa7	(10,49±2,05)	XRz7	(68,30±6,87)

Příloha č. 5: Hodnoty tvrdostí

PL20						
Základní materiál	1.	66,9	67,2	67,2		
	2.	67	67,3	67,2		
		33,475	33,625	33,6		
Horní část	HV	165	164	164		
	1.	39,6	39,6	39,5	40	39,6
	2.	39,8	40	39,6	39,8	39,9
Střední část		19,85	19,9	19,775	19,95	19,875
	HV	468	468	473	464	468
	1.	39,6	39,1	39,4	40	39,6
Spodní část	2.	39,4	39,6	39,8	39,4	39,8
		19,75	19,675	19,8	19,85	19,85
	HV	473	478	473	468	468
	1.	40,6	40,9	40,8	40,8	40,2
	2.	40,8	40,6	40,6	40,3	40,7
		20,35	20,375	20,35	20,275	20,225
	HV	446	446	446	450	455
PL15						
Základní materiál	1.	67,3	67,5	67,6		
	2.	67,1	67,3	67,3		
		33,6	33,7	33,725		
Horní část	HV	164	163	163		
	1.	39,6	39,4	39,4	39,6	39,2
	2.	40,1	39,2	39,3	39,5	39,4
Střední část		19,925	19,65	19,675	19,775	19,65
	HV	468	478	478	473	478
	1.	39,6	39,5	40	39,8	39,7
Spodní část	2.	39,4	39,4	39,8	40	39,9
		19,75	19,725	19,95	19,95	19,9
	HV	473	478	464	464	468
	1.	39,6	39,3	39,6	39,4	39,2
	2.	39,6	39,9	39,4	39,9	39,6
		19,8	19,8	19,75	19,825	19,7
	HV	473	473	473	473	478
PL10						
Základní materiál	1.	68	68,2	68,4		
	2.	68,4	67,8	67,9		
		34,1	34	34,075		
Horní část	HV	160	160	160		
	1.	39,4	39,7	39,4	39,7	39,5

	2.	39,7	39,6	39,6	39,5	39,9
		19,775	19,825	19,75	19,8	19,85
	HV	473	473	473	473	468
Střední část	1.	40	39,5	39,6	39,5	39
	2.	39,8	39,9	39,8	40	40
		19,95	19,85	19,85	19,875	19,75
	HV	464	468	468	468	473
Spodní část	1.	39,5	39,8	39,5	39,4	39,8
	2.	40	39,9	39,8	39,8	39,6
		19,875	19,925	19,825	19,8	19,85
	HV	468	468	473	473	468

#### PL4

Základní materiál	1.	69	69,3	69		
	2.	69,1	69,5	69,4		
		34,525	34,7	34,6		
	HV	156	154	155		
Střední část	1.	40,1	40,2	39,8	40,2	40,2
	2.	40,9	40,4	40,2	40,4	40,6
		20,25	20,15	20	20,15	20,2
	HV	450	455	464	455	455

#### OXY20

Základní materiál	1.	68,3	68,2	68,2		
	2.	68,8	67,8	67,6		
		34,275	34	33,95		
Horní část	HV	158	160	160		
	1.	47,2	49	49,4	49,2	49,4
	2.	48,2	49,3	49,5	49,8	49,6
		23,85	24,575	24,725	24,75	24,75
	HV	325	306	304	302	302
Střední část	1.	41,2	41,3	41	40,8	40,2
	2.	41	41	41,8	41,4	40,8
		20,55	20,575	20,7	20,55	20,25
	HV	437	437	433	437	450
	Spodní část	1.	38,2	38,3	38,2	38,6
2.		38,3	39	38,9	38,9	38,7
		19,125	19,325	19,275	19,375	19,325
HV		508	498	498	493	498

#### OXY15

Základní materiál	1.	66,8	66,4	67
	2.	67	66,8	67,4
		33,45	33,3	33,6

Horní část	HV	165	167	164		
	1.	51,2	51	52	51	52
	2.	51	51,2	52,1	51,4	52,2
		25,55	25,55	26,025	25,6	26,05
Střední část	HV	283	283	274	283	272
	1.	47	46,5	47,8	48,2	46,1
	2.	49	47	46,8	46,6	48
		24	23,375	23,65	23,7	23,525
Spodní část	HV	322	339	330	330	336
	1.	44	44	43,3	44,3	43,3
	2.	44,8	43,2	43,1	43,3	43,8
		22,2	21,8	21,6	21,9	21,775
OXY10		376	390	397	387	390
Základní materiál	1.	68	68,2	68,4		
	2.	67,8	67,8	68,2		
		33,95	34	34,15		
	HV	160	160	159		
Horní část	1.	54,5	54,7	54,8	55	55
	2.	55	55,2	55	55,2	54,4
		27,375	27,475	27,45	27,55	27,35
	HV	247	245	245	243	247
Střední část	1.	52,5	52,2	52	52,4	52,4
	2.	52,9	52,8	52,8	52,9	52,5
		26,35	26,25	26,2	26,325	26,225
	HV	266	268	270	268	270
Spodní část	1.	51,5	52,2	52,3	52	52,3
	2.	52	52	52,4	52,6	52,4
		25,875	26,05	26,175	26,15	26,175
	HV	276	272	270	270	270
OXY4						
Základní materiál	1.	68,2	68,3	67,8		
	2.	68,8	68,5	68,3		
		34,25	34,2	34,025		
	HV	158	159	160		
Střední část	1.	58,1	58,2	57,4	58,3	57,5
	2.	58,3	57,6	58	57,8	58
		29,1	28,95	28,85	29,025	28,875
	HV	219	221	222	221	222